



**FACULTAD DE CIENCIAS**

**GRADO EN INGENIERÍA QUÍMICA**



TRABAJO FIN DE GRADO

**DISEÑO DE UN PROCESO DE PRODUCCIÓN DE CUMNO MEDIANTE UN  
REACTOR DE ALQUILACIÓN Y UN REACTOR DE TRANSALQUILACIÓN  
CATALÍTICOS**

**AUTOR:  
D. ALBERTO BARBA ESPINAR**

**JULIO, 2020**



**FACULTAD DE CIENCIAS**

**GRADO EN INGENIERÍA QUÍMICA**



**TRABAJO FIN DE GRADO**

**DISEÑO DE UN PROCESO DE PRODUCCIÓN DE CUMENO MEDIANTE UN  
REACTOR DE ALQUILACIÓN Y UN REACTOR DE TRANSALQUILACIÓN  
CATALÍTICOS**

**AUTOR:**

**D. ALBERTO BARBA ESPINAR**

**TUTOR:**

**D. LUIS ISIDORO ROMERO GARCÍA**

**D. CARLOS JOSÉ ÁLVAREZ GALLEGO**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**FIRMA DEL ALUMNO.**

## ÍNDICE GENERAL

### DOCUMENTO 1: Memoria Descriptiva

1. RESUMEN
2. SUMMARY
3. OBJETO Y JUSTIFICACIÓN
4. ALCANCE
5. ANTECEDENTES
6. LOCALIZACIÓN
7. NORMATIVA Y REFERENCIAS
8. REQUISITOS DE DISEÑO
9. ABREVIATURAS Y NOMENCLATURA
10. METODOLOGÍA Y MODELADO
11. DISEÑO DEL PROCESO
12. PLANIFICACIÓN

### DOCUMENTO 2: Anexos

1. ANEXO 1: BALANCES DE MATERIA
2. ANEXO 2: DISEÑO MECÁNICO Y TERMODINÁMICO DEL REACTOR DE ALQUILACIÓN
3. ANEXO 3: DISEÑO MECÁNICO Y TERMODINÁMICO DEL REACTOR DE TRANSALQUILACIÓN
4. ANEXO 4: CÁLCULO DE LA MASA DE CATALIZADOR NECESARIA EN EL REACTOR DE ALQUILACIÓN
5. ANEXO 5: CÁLCULO DE LA MASA DE CATALIZADOR NECESARIA EN EL REACTOR DE TRANSALQUILACIÓN
6. ANEXO 6: CÁLCULO DE LA CAÍDA DE PRESIÓN EN E REACTOR DE ALQUILACIÓN
7. ANEXO 7: CÁLCULO DE LA CAÍDA DE PRESIÓN EN E REACTOR DE TRANSALQUILACIÓN
8. ANEXO 8: FICHAS DE SEGURIDAD DE LOS REACTIVOS
9. ANEXO 9: FICHAS DE SEGURIDAD DE LOS PRODUCTOS

### DOCUMENTO 3: Planos

1. PLANO DEL REATOR DE ALQUILACIÓN
2. PLANO DEL REACTOR DE TRANSALQUILACIÓN

## DOCUMENTO 4: Pliego de Condiciones

1. CONDICIONES GENERALES
2. CONDICIONES DE ÍNDOLE FACULTATIVA
3. CONDICIONES DE ÍNDOLE ECONÓMICA
4. CONDICIONES DE ÍNDOLE LEGAL
5. CONDICIONES DE ÍNDOLE TÉCNICA

## DOCUMENTO 5: Presupuestos

1. INTRODUCCIÓN
2. PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL
3. PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN POR CONTRATA
4. COSTES GENERALES

## DOCUMENTO 6: Estudio de Seguridad y Salud

1. INTRODUCCIÓN
2. RAZÓN DE LA REALIZACIÓN DEL ESTUDIO BÁSICO DE SEGURIDAD Y SALUD
3. INSTALACIONES PROVISIONALES Y ASISTENCIA SANITARIA
4. MAQUINARIA DE LA OBRA
5. MEDIOS AUXILIARES
6. RIESGOS LABORALES EVITABLES
7. RIESGOS LABORALES INEVITABLES
8. RIESGOS LABORALES ESPECIALES
9. PREVISIONES PARA TRABAJOS FUTUROS
10. NORMATIVA DE SEGURIDAD Y SALUD APLICADA A LA OBRA

## DOCUMENTO 7: Evaluación del Impacto Ambiental

# DOCUMENTO

# 1: MEMORIA

# DESCRIPTIVA

## Contenido

1.	RESUMEN .....	4
2.	SUMMARY.....	5
3.	OBJETO Y JUSTIFICACIÓN .....	6
4.	ALCANCE.....	7
5.	ANTECEDENTES .....	8
5.1.	CARACTERÍSTICAS DE LOS PRODUCTOS .....	8
5.1.1.	CUMENO.....	8
5.1.2.	DIISOPROPILBENCENO .....	9
5.2.	CARACTERÍSTICAS DE LOS REACTIVOS .....	9
5.2.1.	BENCENO .....	9
5.2.2.	PROPILENO .....	10
5.2.3.	PROPANO .....	11
5.3.	APLICACIONES INDUSTRIALES.....	12
5.4.	ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS .....	13
5.5.	CINÉTICA.....	14
5.5.1.	REACTOR DE ALQUILACIÓN.....	14
5.5.2.	REACTOR DE TRANSALQUILACIÓN .....	16
6.	LOCALIZACIÓN .....	17
7.	NORMATIVA Y REFERENCIAS .....	18
7.1.	DISPOSICIONES REGLAMENTARIAS.....	18
7.2.	NORMATIVA APLICADA AL DISEÑO.....	18
7.3.	SOFTWARE.....	19
7.4.	REFERENCIAS .....	19
8.	REQUISITOS DE DISEÑO .....	21
9.	ABREVIATURA Y NOMENCLATURA .....	22
10.	METODOLOGÍA Y MODELADO .....	23
11.	DISEÑO DEL PROCESO .....	24
11.1.	CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN .....	24
11.2.	REACTOR DE ALQUILACIÓN.....	24
11.2.1.	CORRIENTES DE ENTRADA .....	26
11.2.2.	TEMPERATURA Y PRESIÓN EN EL REACTOR.....	26
11.2.3.	TEMPERATURA DEL FLUIDO REFRIGERANTE. ....	27
11.2.4.	(UG), DIMENSIONES DEL REACTOR Y NÚMERO DE TUBOS.....	28
11.2.5.	MASA DE CATALIZADOR NECESARIA. ....	29

11.2.6.	CAIDA DE PRESIÓN EN EL REACTOR.....	30
11.3.	REACTOR DE TRANSALQUILACIÓN .....	31
11.3.1.	TEMPERATURA Y PRESIÓN EN EL REACTOR.....	32
11.3.2.	CAUDAL DE BENCENO RECIRCULADO .....	32
11.3.3.	TEMPERATURA DEL FLUIDO REFRIGERANTE. ....	32
11.3.4.	(UG), DIMENSIONES DEL REACTOR Y NÚMERO DE TUBOS.....	33
11.3.5.	MASA DE CATALIZADOR NECESARIA. ....	34
11.3.6.	CAÍDA DE PRESIÓN EN EL REACTOR.....	36
12.	PLANIFICACIÓN.....	37

## 1. RESUMEN

La industria química juega un papel determinante dentro de nuestra sociedad y esto va a mayor a medida que avanzamos en el tiempo. Si se observa todo aquello que está en nuestro alrededor se puede llegar a la conclusión de que la mayor parte de los productos que se emplean en la vida cotidiana pertenecen a esta industria.

El fin de este TFG es el diseño de un proceso de producción de isopropilbenceno, comúnmente conocido como cumeno. Dicho diseño se realizará a través de las pertinentes ecuaciones de diseño y la cinética de las reacciones que se llevan a cabo dentro del proceso.

El cumeno es uno de los compuestos más importantes de la industria química. Este compuesto se utiliza primordialmente para la elaboración de fenol y acetona. Uno de los derivados más importantes del fenol es el Bisfenol A ya que este compuesto se utiliza para la elaboración de plásticos que se utilizan para crear envases como botellas de agua o incluso es un material que se encuentra en varios electrodomésticos. También, el cumeno, es utilizado como un fuerte disolvente de pinturas.

El diseño se realizará con la utilización de dos reactores, el reactor de alquilación, donde se producen la reacción de alquilación y la reacción secundaria de polialquilación y el reactor de alquilación, donde se produce la reacción de transalquilación.



## 2. SUMMARY

The chemical industry plays a determining role in our society and this increases as we go through time. If we observe everything that is around us, we can conclude that most of the products that are used in daily life belong to this industry.

The purpose of this TFG is to design an isopropylbenzene production process, commonly known as cumene. Said design will be carried out through the pertinent design equations and the kinetics of the reactions that are carried out within the process.

Cumene is one of the most important compounds in the chemical industry. This compound is used primarily for the manufacture of phenol and acetone. One of the most important derivatives of phenol is Bisphenol A since this compound is used to make plastics that are used to create containers such as water bottles or it is even a material found in various household appliances. Also, cumene is used as a strong paint thinner.

The design will be carried out with the use of two reactors, the alkylation reactor, where the alkylation reaction and the secondary polyalkylation reaction take place, and the alkylation reactor, where the transalkylation reaction occurs.

### 3. OBJETO Y JUSTIFICACIÓN

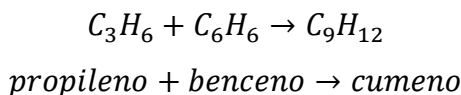
El objetivo de este trabajo fin de grado es el diseño de dos reactores multitubulares catalíticos, con los que se llevará a cabo un proceso de producción de 500.000 t/año de cumeno a partir de propileno y benceno provenientes de otros procesos desarrollados en la propia planta.

La pureza del producto final, que es un requisito de diseño, debe ser, como mínimo, (99.9%) ya que es una característica necesaria para su posterior conversión en fenol.

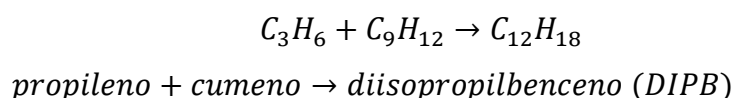
El primer reactor consiste en un reactor de alquilación, en el que, además de la reacción principal de formación de cumeno, se produce una reacción secundaria no deseada, por lo que es necesario utilizar un segundo reactor de transalquilación para llegar al grado de pureza de cumeno requerida.

#### REACCIONES EN EL REACTOR DE ALQUILACIÓN

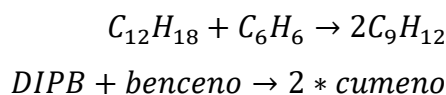
1- Reacción principal de alquilación



2- Reacción secundaria de polialquilación



#### REACCIÓN EN EL REACTOR DE TRANSALQUILACIÓN



Además, de forma complementaria, se procederá a la resolución de los pertinentes balances de materia de cada una de las unidades de separación.

## 4. ALCANCE

El alcance del presente Trabajo Fin de Grado abarca el diseño de las unidades de reacción que son necesarias para alcanzar los objetivos fijados y la resolución de los balances para las posteriores unidades de separación (columnas de rectificación).

Se diseña el sistema buscando el compromiso entre la mayor producción de cumeno posible y el cumplimiento del grado de pureza del mismo, explicitado en el requisito de diseño ya citado, al final de dicho proceso. Se buscarán las condiciones que favorezcan la cinética de las reacciones principales, así como las condiciones que mejor se adapten al catalizador seleccionado para que se obtenga el mejor rendimiento del proceso.

La alimentación será una corriente líquida de reactivos, provenientes de un tanque de almacenamiento a presión. Estos tanques alimentan al reactor de alquilación multitubular, en el que se produce un producto secundario no deseado que se llevará a un reactor de transalquilación multitubular para su conversión y así poder asegurar la pureza del producto final.

Queda fuera del alcance de este TFG el diseño y dimensionamiento de las posteriores unidades de separación, así como el diseño y dimensionamiento de los diferentes intercambiadores de calor, bombas e instalación eléctrica que intervienen en el proceso.

El proceso central de este estudio es la producción de cumeno mediante la alquilación y la transalquilación del benceno, empleando una zeolita  $\beta$  como agente catalizador. Adicionalmente, se realizarán los pertinentes balances de materia de las distintas unidades de separación, así como los estudios básicos de seguridad y evaluación de impacto ambiental.

## 5. ANTECEDENTES

### 5.1. CARACTERÍSTICAS DE LOS PRODUCTOS

#### 5.1.1. CUMENO

El isopropilbenceno, comúnmente denominado cumeno, es un hidrocarburo aromático, que se presenta en estado líquido en condiciones ambientales y que es insoluble en agua.

Se obtiene de derivados del petróleo, siendo el proceso más empleado para su producción la alquilación del benceno con propileno.

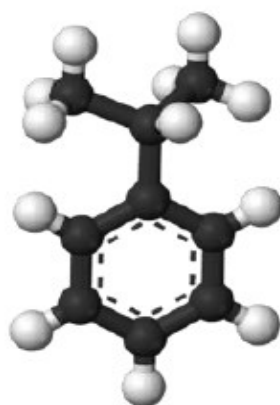


Figura 1: Cumeno

Entre otros usos, como la elaboración de barnices, disolvente de pinturas y producción de acetofenona, precedente de estireno y resinas, se usa primordialmente para la síntesis de fenol y acetona, que son productos básicos de la industria química pesada. Este compuesto puede producir efectos adversos en el organismo humano como fatigas, vértigos o adormecimientos como indica la ficha de seguridad del anexo 9.

En la actualidad, CEPESA es la empresa con mayor producción de cumeno en el mundo, produciendo en torno de 1.000.000 t/año de isopropilbenceno (Chemical Safety Facts, 2020).

### 5.1.2. DIISOPROPILBENCENO

El diisopropilbenceno (DIPB) es un hidrocarburo líquido en condiciones ambientales, inflamable, con un fuerte olor y con un color ámbar. Tiene 3 isómeros:

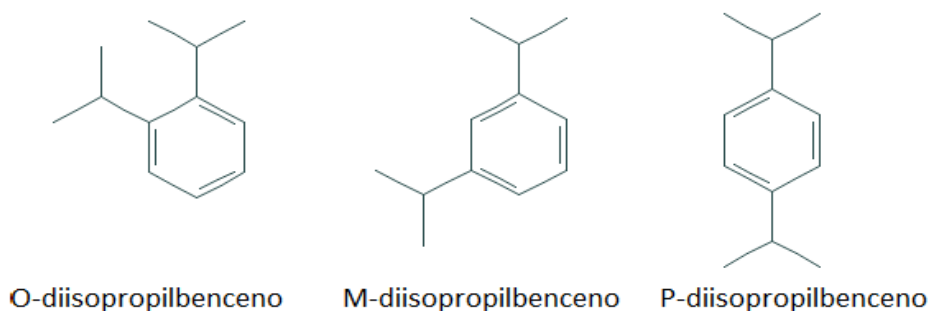


Figura 2: DIPB

La principal forma de obtener DIPB es como producto secundario del proceso de alquilación de benceno con propileno. El DIPB se puede utilizar como combustible o, cómo en este caso, volver a convertirlo en cumeno mediante la reacción de transalquilación ya citada anteriormente.

Al igual que el cumeno puede producir efectos adversos en humanos como jaquecas, vértigos o adormecimientos (Chemical Safety Facts, 2020). Su ficha de seguridad puede consultarse en el anexo 8.

## 5.2. CARACTERÍSTICAS DE LOS REACTIVOS

### 5.2.1. BENCENO

Se trata de un hidrocarburo aromático que se encuentra en estado líquido en condiciones ambientales, incoloro, volátil y muy inflamable, el cuál es obtenido como un derivado del petróleo.

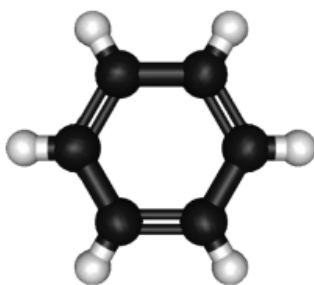


Figura 3: Benceno

Este reactivo es miscible con todos los disolventes orgánicos, además de tratarse de un tipo de disolvente eficaz para ceras, fósforo, gomas, etc.

Es totalmente insoluble en agua y entre sus fines principales sobresale como compuesto utilizado en la síntesis de productos que se utilizan en la elaboración de plásticos y también como disolvente industrial.

Se trata de un compuesto que resulta muy perjudicial para la salud humana, produciendo en las personas que están en contacto con él, durante un periodo corto de tiempo, efectos como: mareos, pérdida del conocimiento e irritación de las vías respiratorias. También puede causar, a largo plazo, daños neurológicos y en el sistema inmunitario, así como favorecer la aparición de tumores (Chemical Safety Facts, 2020). Su ficha de seguridad puede consultarse en el anexo 9.

#### 5.2.2. PROPILENO

El propileno es un hidrocarburo que a temperatura ambiente se encuentra en estado gaseoso. Es incoloro, no corrosivo y muy inflamable. Es insoluble en agua, pero soluble en ácidos y alcoholes.

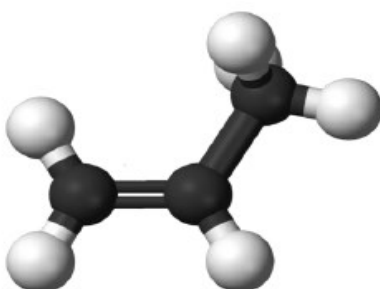


Figura 4: Propileno

Se obtiene del petróleo, aislándose de los demás productos mediante destilación a temperatura baja. Normalmente, como en el caso de este trabajo, suele provenir de una planta de pirólisis, por lo que incluye en torno al 5% de propano como impureza.

Se utiliza principalmente para la producción de polipropileno. También es empleado como combustible para soldaduras y en la fabricación de elementos electrónicos.

Como los anteriores productos químicos, resulta muy perjudicial para el hombre, ya que al inhalar propileno se pueden producir efectos como desmayos, mareos, problemas de hígado, sistema nervioso y corazón. Si hay contacto con propileno líquido puede llegar a la congelación (Bolívar, G, (2018)). Su ficha de seguridad puede consultarse en el anexo 9.

### 5.2.3. PROPANO

Se trata de un hidrocarburo incoloro y gaseoso en condiciones ambientales, muy inflamable y que puede llegar a formar mezclas de carácter explosivo con aire.



Figura 5: Propano

Se utiliza principalmente como combustible tanto para uso doméstico como industrial, mezclándose a veces con butano ya que el propano tiene un poder calorífico mayor. Se utiliza también como combustible para algunos motores o para generar electricidad en turbinas de gas, así como de refrigerante.

En cuanto a la salud puede afectar de forma muy negativa a los seres humanos, provocando una disminución de la concentración de oxígeno en el aire, así como dolor de cabeza, desmayos, etc. (INSST, 2018). Su ficha de seguridad puede consultarse en el anexo 9.

### 5.3. APLICACIONES INDUSTRIALES

El fin de este trabajo es el diseño de dos reactores para la producción de isopropilbenceno, comúnmente llamado cumeno. Este se obtiene a partir de la alquilación del benceno con propileno y de la transalquilación del benceno con diisopropilbenceno (DIPB).

El isopropilbenceno es uno de los productos con más importancia dentro de la industria química, y en su producción se utiliza aproximadamente un 8% de la producción total de propileno y entre un 25% y un 26% de la producción total de benceno.

El isopropilbenceno o cumeno, se usa para la producción de acetofenonas además de disolvente para barnices y pinturas.

A pesar de esto, se utiliza primordialmente como materia prima para producir acetona y fenol a partir del proceso Hock.

El producto de mayor importancia es el fenol y entre sus usos pueden destacarse los siguientes:

- 1- Uno de los derivados más importantes del fenol es el bisfenol A, que se utiliza para la producción de la resina epoxi, la cual se utiliza en la elaboración de materiales muy diferentes: dispositivos dentales, electrodomésticos, maquinaria médica, elementos de ordenadores, etc.
- 2- Entre un 20% y un 23% de la producción se utiliza para elaborar caprolactama, que es el precursor del Nylon utilizado como tejido, incluso en la fabricación de elementos industriales como tornillería, partes de automóviles, etc.
- 3- Se utiliza también para la producción de ácido acetilsalicílico, comúnmente conocido como aspirina, incluso para otros derivados de la fabricación de productos farmacéuticos, productos clínicos o agrícolas en los que se utiliza como desinfectante.

Por otra parte, la acetona se utiliza en la gran mayoría de los casos en la elaboración de



una resina de carácter sintético, Polimetilmetacrilato, que se utiliza en la construcción. También se utiliza en la síntesis de Bisfenol A y como disolvente.

#### **5.4. ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS**

En el presente TFG se pretenden conseguir dos objetivos principalmente:

- 1- Producir un caudal de cumeno de 500.000 t/año
- 2- Que este cumeno tenga una pureza de, al menos, el 99,9%

Dicho caudal se consigue conociendo o calculando el caudal de reactivos necesarios para conseguir este propósito como se indicará en el apartado de Diseño de Proceso.

Para determinar que se cumpla el grado de pureza requerido, el proceso consta de dos opciones principales:

- 1- Asegurar la pureza a partir de la etapa de separación.
- 2- Asegurar la pureza a partir de la etapa de reacción.

Antes de realizar la propuesta se estudiaron varias alternativas. Así, dado que es posible alcanzar el grado de pureza requerido mediante ambas opciones, fue necesario analizar cuál de ellas era la más idónea económica y ambientalmente.

Al analizar, de forma no exhaustiva, la alternativa de garantizar la pureza en la etapa de separación, utilizando así solo un reactor, se llegó a la conclusión de que para garantizar esta pureza era necesario un sistema de separación de cumeno y DIPB que tuviese entre 40 y 45 platos más que utilizando el reactor de transalquilación, cuyas dimensiones no eran idóneas para su construcción, y hubiese sido necesaria la construcción de otra columna de destilación, lo cual incrementaría sustancialmente, el precio del equipamiento necesario para el proceso.

Analizando la alternativa de utilizar otra etapa de reacción, el reactor de transalquilación, y así producir cumeno a partir del DIPB, se llegó a la conclusión de que el reactor que requerido no tendría un volumen ni unas características fuera de lo común, diseñándose

un reactor que no ocuparía mucho espacio y a su vez reduciría el coste de construcción de la columna de destilación necesaria para la separación del DIPB y el cumeno. Por tanto, se adoptó esta última alternativa para el diseño de este proceso.

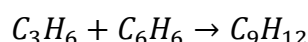
El análisis de los resultados finales obtenidos en el diseño refrenda que la segunda etapa de reacción es pequeña y compensa la sustancial reducción de la etapa posterior de separación.

## 5.5. CINÉTICA

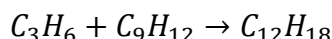
### 5.5.1. REACTOR DE ALQUILACIÓN

Dado que para este proceso es necesario que se favorezca la selectividad de cumeno con respecto al propileno y, además, que esta reacción se produzca en el menor tiempo posible, es necesaria la utilización de un catalizador, como la zeolita  $\beta$ , para garantizar el cumplimiento de estas restricciones.

Por tanto, la reacción que se quiere favorecer es la de alquilación de propileno con benceno para dar cumeno. Además, dicha reacción se produce en estado líquido, en condiciones elevadas de presión y temperatura.



La reacción secundaria no deseada que tiene lugar es la ya citada de polialquilación de cumeno para producir diisopropilbenceno. Se pretende que la selectividad del proceso sea la adecuada para que la extensión de esta reacción sea la mínima posible.



Ya que en ambas reacciones es el propileno el que reacciona, no sólo es necesario utilizar un catalizador que mejore la selectividad de la reacción de alquilación, sino que, además, es necesario que este reactivo se encuentre en menor proporción que el benceno, para que así el propileno llegue a reaccionar en su totalidad y desfavorezca aún más a la reacción

secundaria de polialquilación. La proporción seleccionada es 1:5; es decir, entran en el reactor 5 moles de benceno, como mezcla de benceno nuevo y benceno recirculado en la etapa de separación, por cada mol de propileno, lo que constituye un exceso del 400% del benceno estequiométrico necesario.

Las dos reacciones que tienen lugar son reacciones irreversibles y fuertemente exotérmicas y de segundo orden global. Los datos cinéticos de ambas se muestran a continuación:

	Reacción 1	Reacción 2
$K_o(\text{kg}/(\text{mol}\cdot\text{s}))$	2,80E+07	2,32E+09
$E_a$ (kJ/kmol)	104174	146742

**Tabla 1: Datos cinéticos alquilación. Fuente Turton (2002).**

Estos datos se ajustan a la reacción cuando dicha reacción no está en presencia del catalizador de zeolita  $\beta$ .

A continuación, se muestran los datos cinéticos que se corresponden a ensayos que han sido publicados por Corma et al. (1996), donde se encuentran los resultados de esta reacción en presencia del catalizador. Dichos resultados fueron obtenidos al realizar experiencias en un reactor de flujo en fase líquida, que utilizaba zeolita  $\beta$  como catalizador. Ya que estas partículas tienen un tamaño muy pequeño no existen limitaciones de difusión por transferencia de materia.

	Reacción 1	Reacción 2
$K_o(\text{kg}/(\text{mol}\cdot\text{s}))$	750	400
$E_a$ (kJ/kmol)	84300	88142

**Tabla 2: Datos cinéticos alquilación zeolita  $\beta$**

Se observa que la energía de activación y la constante de velocidad son menores en presencia del catalizador.

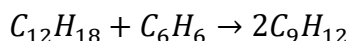
Ya que las reacciones que ocurren son fuertemente exotérmicas, se utiliza un reactor multitubular ya que este tipo de reactores mejora el control de los gradientes de temperaturas frente al reactor de lecho fijo tubular.

#### 5.5.2. REACTOR DE TRANSALQUILACIÓN

El DIPB que se forma en el reactor de alquilación es necesario que se elimine de la corriente de cumeno para poder así garantizar ese nivel de pureza que es necesario alcanzar. Para ello que se realiza el diseño de un reactor de transalquilación para reconvertir ese DIPB, producido en el reactor de alquilación, en cumeno.

Se trata de otra reacción fuertemente exotérmica, es por ello, que se vuelve a utilizar un reactor multitubular el cual facilita el control del gradiente de temperatura frente al reactor de lecho fijo tubular.

Para este reactor se vuelve a utilizar el mismo catalizador que en el reactor de alquilación ya que aumenta la selectividad de esta. La reacción que se lleva a cabo es la siguiente:



En ella se puede apreciar que por cada mol de DIPB que reacciona se producen dos de cumeno. La cinética de esta reacción en presencia del catalizador es la siguiente:

	R. Transalquilación
$K_o$ (kg/(mol*s))	7000
$E_a$ (kJ/kmol)	11200

Tabla 3: Datos cinéticos R. Transalquilación zeolita β. R. Thakur, S. Barman, y K. Gupta (2016).

## 6. LOCALIZACIÓN

En este trabajo se propone un proceso de producción de cumeno a escala industrial ya que el caudal de producto se enmarca dentro de un rango típico de la escala industrial para este proceso.

El proceso a implantar se ubicaría dentro de las instalaciones de la empresa CEPSA situada en su instalación de San Roque (Cádiz), dentro de la zona de refino, lo cual facilitaría la obtención de los reactivos y minimizaría el coste por transporte.

El propileno necesario proviene de una planta de pirólisis situada en el mismo complejo, de ahí que el propileno contenga impurezas de propano, mientras que el benceno proviene del proceso de destilación fraccionada del crudo de petróleo, obteniéndose además tolueno y xileno.

Este complejo industrial dispone de espacio suficiente para el almacenamiento de productos, además de disponer de los servicios necesarios, tales como agua, electricidad, vapor, etc. Hay que destacar que este producto en casi su totalidad será destinado a la obtención de fenol, dentro de la propia planta, como se ha comentado con anterioridad.



**Imagen 1: Localización**

## 7. NORMATIVA Y REFERENCIAS

### 7.1. DISPOSICIONES REGLAMENTARIAS

El objetivo que se persigue es el dimensionamiento de las unidades de reacción de una planta para producir un determinado caudal de cumeno, con unas especificaciones de pureza requeridas. Ya que todos los productos, subproductos y reactivos son utilizados o bien para otro proceso o bien como combustible, se considera que en este proceso no se producen residuos en cantidades apreciables más allá de los habituales residuos colaterales asociados a las tareas de mantenimiento y limpieza.

Dado que el objeto del proyecto se ubica en CEPSA ha de considerarse que se trata de una instalación certificada bajo las normas

- Norma UNE-EN-ISO 9001:2015.
- Norma UNE-EN-ISO 14001:2015.

### 7.2. NORMATIVA APLICADA AL DISEÑO

La normativa y legislación considerada en el diseño del proceso se cita a continuación:

- Norma Tema Clase B: Para el diseño de intercambiadores de calor de carcasa y tubos destinados a procesos químicos.
- Norma UNE 6708/1996 para establecer el diámetro nominal de las tuberías.
- Norma UNE 157001:2014. Criterios generales para la elaboración formal de los documentos que constituyen un proyecto técnico.
- Real Decreto 656/2017, de 23 de junio, por el que se aprueba el Reglamento de Almacenamiento de Productos Químicos y sus Instrucciones Técnicas Complementarias.
- Real Decreto 2060/2008, de 12 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento de equipos a presión y sus instrucciones técnicas complementarias.
- Real Decreto 560/2010, de 7 de mayo, por el que se modifican diversas normas reglamentarias en materia de seguridad industrial para adecuarlas a la Ley 17/2009, de 23 de noviembre, sobre el libre acceso a las actividades de servicios y su ejercicio, y la Ley 25/2009, de 22 de diciembre, de modificación de diversas

leyes para su adaptación a la Ley sobre el libre acceso a las actividades de servicios y su ejercicio.

- Directiva 2014/29/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 26 de febrero de 2014, sobre la armonización de las legislaciones de los Estados miembros en materia de comercialización de los recipientes a presión simples.
- Ley 16/2002, de 1 de julio, de Prevención y Control Integrados de la Contaminación y su modificación, Ley 5/2013, de 11 de junio.

### 7.3. SOFTWARE

- Microsoft Word 2019™, como procesador de textos.
- Microsoft Excel 2019™ y Aspen Plus™ V.9, para realización de cálculos y obtención de datos.
- Microsoft Visio 2019™, para la elaboración de diagramas de flujos.
- Microsoft Project 2019™, para la elaboración de la planificación.
- AutoCad 2020™, para la elaboración de planos.

### 7.4. REFERENCIAS

- Chemical Safety Facts (2020): Cumeno. Recuperado de <https://www.chemicalsafetyfacts.org/es>
- Chemical Safety Facts (2020): Diisopropilbenceno. Recuperado de <https://www.chemicalsafetyfacts.org/es>
- Chemical Safety Facts (2020): Benceno. Recuperado de <https://www.chemicalsafetyfacts.org/es>
- Gabriel Bolivar. Propileno: Estructura Química, Propiedades y usos. (2018). Recuperado de <https://www.lifeder.com>
- Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (2018): Ficha técnica del propano. Recuperado de <https://www.insst.es>
- Alexandre C. (2008). Alkylation of Benzene by Propylene to Cumene. *Chemical Process Design*
- R. Thakur, S. Barman, y K. Gupta (2016). Synthesis of cumene by transalkylation over modified beta zeolite: A kinetic study. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 33(4), 957-967

- Luyben, W.L. (2010). Design and control of the Cumene Process, *Industrial Engineering and Chemistry Research* 49, 719-734
- Froment, G.F., Bischoff, K.B. (1990), *Chemical Reactor Analysis and Design*. 2nd Edition, Wiley, New York.
- Mendoza P, Heriberto (2006), *Desarrollo de un procedimiento de cálculo mejorado para diseño térmico y/o evaluación térmica de intercambiadores de calor de carcasa-haz de tubos*,UCV
- Levenspiel, O. (1999), *Chemical Reaction Engineering*, 3rd Edition, Wiley, New York. (2004) *Ingeniería de las reacciones químicas*.
- C. Chapra y C. Canale, (2015), *Métodos numéricos para ingenieros*, Séptima edición.
- Hill, C.G. Ed. John Wiley & Sons (1979). *An Introduction to Chemical Engineering Kinetics & Reactor Design*.



## 8. REQUISITOS DE DISEÑO

Aunque el diseño del tren de separación no se encuentra dentro del alcance de este TFG, en el siguiente diagrama se observan todas las unidades que intervienen en el proceso de producción de cumeno:

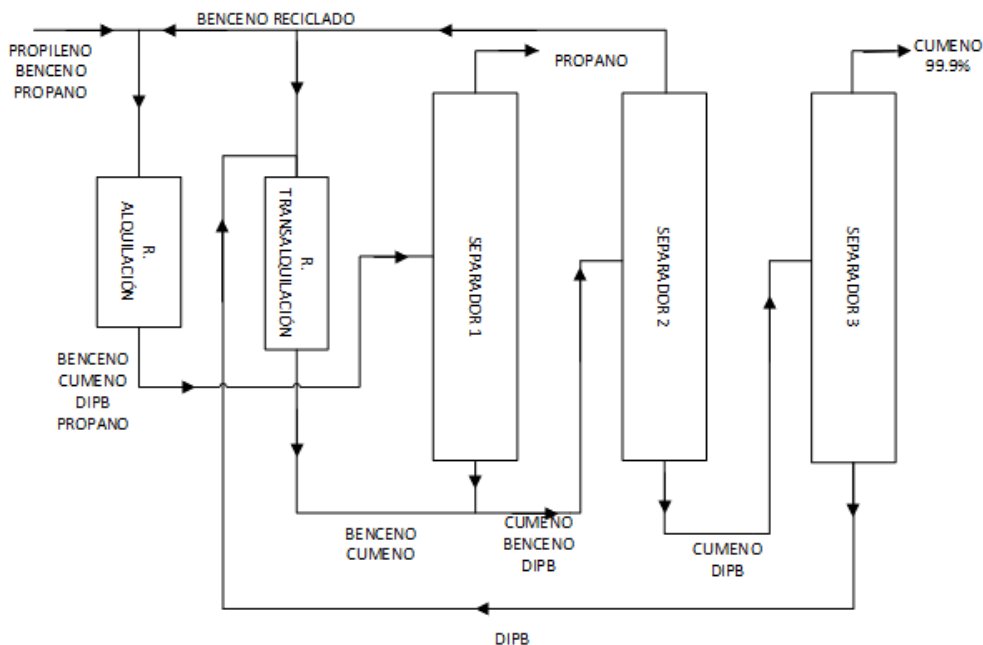


Figura 6: Esquema del proceso

Los equipos de interés para el presente TFG son los dos reactores que intervienen en el proceso y el compuesto de interés el cumeno el cual deberá cumplir una serie de requisitos a la salida del proceso. Es por ello, que a la hora del diseño de los dos reactores se han tenido en cuenta los siguientes aspectos de diseño, a partir de un análisis cuantitativo y cualitativo:

- Será necesario llegar a un caudal de 500.000 toneladas de cumeno al año.
- Esta corriente de salida deberá tener como mínimo una pureza de cumeno del 99.9%.

## 9. ABREVIATURA Y NOMENCLATURA

DIPB: Diisopropilbenceno.

$dW_t$ : Diferencial de masa de catalizador por tubo (kg).

$dX_A$ : Diferencial de conversión del reactivo limitante.

$(w_{A,0})_t$ : caudal molar de alimento por tubo ( $\text{mol/s}$ ).

$-r'_A(T, X_A)$ : velocidad de reacción por unidad de masa de catalizador ( $\text{mol/kg} \cdot \text{s}$ ).

$dT$ : Diferencial de Temperatura en el reactor ( $^{\circ}\text{C}$ ).

$\Delta H$ : Entalpía de reacción ( $\text{KJ} \cdot \text{Kmol}^{-1}$ ).

$v_A$ : Coeficiente estequiométrico del reactivo limitante.

$U$ : Coeficiente global de Transferencia de Calor ( $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ ).

$T_R$ : Temperatura del fluido refrigerante ( $^{\circ}\text{C}$ ).

$\rho_L$ : Densidad de la partícula de catalizador ( $\text{kg/m}^3$ ).

$w_t$ : Caudal másico de fluido por tubo ( $\text{kg/s}$ ).

$C_{p,f}$ : Capacidad calorífica ( $\text{J} \cdot \text{kg/K}$ ).

$d_t$ : Diámetro de tubo (m).

$P_L$ : Presión al final del tubo (Pa).

$P_o$ : Presión al inicio del tubo (Pa).

$L$ : Longitud del tubo (m).

$D_p$ : Diámetro de la partícula (m)

$G_s$ : Velocidad del fluido ( $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ )

$\varepsilon$ : Porosidad del catalizador

$\mu$ : Viscosidad del fluido ( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ )

## 10. METODOLOGÍA Y MODELADO

Para la elaboración de este Trabajo Fin de Grado se han utilizado varias aplicaciones de software que han permitido la elaboración tanto del modelado del proyecto como de la elaboración del pertinente informe que se ha llevado a cabo.

El simulador Aspen Plus™, es capaz de simular y optimizar cualquier proceso químico, así como cambios en la presión, temperatura o cualquier otra variable del sistema. Esta herramienta ofrece una alternativa para el diseño de equipos industriales además de ser un banco de datos de propiedades físicas y químicas y parámetros termodinámicos esenciales para el diseño del proceso estudiado. Atendiendo a las características del proceso se ha seleccionado, para obtener los datos y parámetros necesarios, el método termodinámico Chao-Sea de la base de datos v35.0.

Dada la complejidad de la resolución de los balances para el diseño de los equipos de reacción multitubulares, se han empleado métodos numéricos. Más concretamente, se ha seleccionado el método de Euler, que se trata de un método de integración numérica destinado para resolver ecuaciones diferenciales ordinarias. Es un método idóneo ya que el diseño del proceso tiene como compromiso la resolución simultánea de las ecuaciones diferenciales de diseño de los reactores.

Este método se aplica mediante el software Microsoft Excel 2019™, el cual es capaz de realizar cálculos muy complejos en cuestión de milésimas de segundo, teniendo así la posibilidad de actuar como un simulador.

## 11. DISEÑO DEL PROCESO

### 11.1. CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN

La planta produce 500.000 toneladas al año de cumeno con un 99,9% de pureza trabajando 357 días al año, durante jornadas de 24 h al día. Para que esto sea así, es necesario que se procesen 500.000 toneladas de propileno al año, o lo que es lo mismo, que se procesen unos 485,54 kmol/h de propileno.

Por tanto, conociendo esto, se puede calcular también el caudal de benceno que entra al reactor ya que se ha impuesto que la relación propileno:benceno sea de 1:5. En consecuencia, el caudal que entra en el reactor de benceno es de 2427,7 kmol/h.

### 11.2. REACTOR DE ALQUILACIÓN

En este reactor se producen dos reacciones: la reacción de alquilación del benceno con propileno para que se produzca cumeno y la reacción de polialquilación entre cumeno y propileno que produce DIPB.

#### REACCIÓN DE ALQUILACIÓN

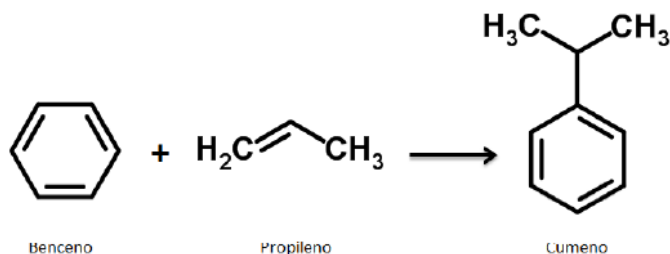


Figura 7: Reacción de alquilación

## REACCIÓN DE POLIALQUILACIÓN

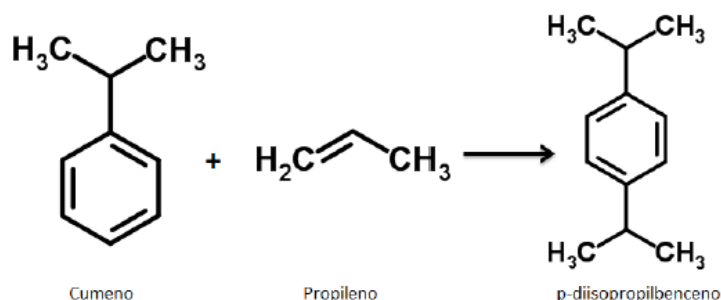


Figura 8: Reacción de polialquilación

El diseño de este reactor debe ser realizado con la meta de conseguir el mayor rendimiento y selectividad de la reacción de alquilación posibles. Esto hace que las condiciones estén limitadas por aquellas que favorezcan la reacción principal de alquilación, minimizando la formación de DIPB.

En este tipo de procesos se utilizan corrientes de reactivos y productos en estado líquido, es por ello, que tendremos que fijar la temperatura y la presión de las corrientes que entran al reactor sin sobrepasar la temperatura máxima del catalizador.

El reactor de alquilación es un reactor multitubular con refrigeración para conseguir un control del gradiente de temperatura que se establece y así no exceder la temperatura máxima del catalizador y trabajar en las mejores condiciones para que se favorezca la reacción de alquilación.

Para optimizar el diseño del reactor de alquilación se abordará el estudio de los siguientes aspectos:

- Temperatura y Presión de entrada del reactor.
- Temperatura del fluido refrigerante.
- Cálculo del coeficiente global de transferencia de calor ( $U_o$ ) entre ambos fluidos.
- Dimensiones del reactor y número de tubos.

- Masa de catalizador necesaria para conseguir los objetivos propuestos.
- Caída de presión a lo largo de los tubos del reactor.

#### 11.2.1. CORRIENTES DE ENTRADA

La entrada del reactor está formada por propileno y benceno, además de propano como impureza.

En condiciones ambientales, el propileno y el propano se encuentran en fase gaseosa. Dado que las condiciones que debe cumplir la corriente de entrada al reactor deben ser aquellas que garanticen una sola fase líquida en el reactor, se requiere trabajar a alta presión.

Los requisitos que debe cumplir la corriente de entrada de 485 kmol/h de propileno son, como se justificará más tarde, 170°C de temperatura y 36 bares de presión.

De igual forma la corriente de benceno deberá entrar en las mismas condiciones, aunque el benceno en condiciones ambientales ya se encuentra en estado líquido.

<b>Alimentación del R. de Alquilación.</b>		
	Caudal (kmol/h)	Fracción molar
Propileno	485,54	0,166
Propano	24,277	0,008
Benceno	2427,7	0,826
Total	2937,517	1

**Tabla 4: Corrientes de entrada al reactor**

El procedimiento de cálculo está descrito al detalle en el anexo 1

#### 11.2.2. TEMPERATURA Y PRESIÓN EN EL REACTOR

La temperatura seleccionada para la entrada del reactor deberá ser aquella a la que se vea favorecida la reacción de alquilación y por tanto la formación de cumeno.

Concluimos, a partir de los datos de las patentes del proceso de producción de cumeno, que las condiciones idóneas son: temperatura dentro del reactor entre 160 y 240°C y presión entre 25 y 36 bares (Luyben, W.L. 2010).

Es pues que se ha fijado una temperatura de entrada en el reactor de 170°C y una temperatura de salida de 237°C, la cual se controlará con el refrigerante, y una presión de 36 bar para garantizar la fase líquida del proceso.

### 11.2.3. TEMPERATURA DEL FLUIDO REFRIGERANTE.

Uno de los aspectos más importantes para el diseño de este reactor es la utilización de un refrigerante y la determinación de su temperatura óptima ya que las reacciones que ocurren en el reactor son fuertemente exotérmicas y es necesario, por tanto, controlar dicha temperatura.

El diseño mecánico, el coeficiente global de intercambio de calor y la temperatura del fluido refrigerante de este reactor multitubular se han obtenido siguiendo el método de Kern, Mendoza P, Heriberto (2006), ya que se trata de uno de los métodos estándar utilizados en la Industria Química para el diseño de intercambiadores de calor de carcasa y tubos y los dos reactores, el de alquilación y el de transalquilación, se comportan como este tipo de intercambiadores y es viable la utilización de este método.

Para la selección del refrigerante y de su temperatura al principio se consideró que se tratara de agua líquida (entrando a 25°C.), pero esto ocasiona problemas en el diseño mecánico, al tener que mantener el estado líquido del refrigerante y ofrecer un salto térmico pequeño. La resolución de las ecuaciones de diseño conducía a un reactor con escasos tubos y excesiva longitud lo que ocasionaba relaciones de L/D fuera de lo común. Además, el caudal de refrigerante necesario era muy elevado y esto suponía costes importantes de operación asociados.

Después de múltiples análisis se ha optado por la utilización de agua próxima a su temperatura de ebullición, 98°C, saliendo como vapor de agua próximo también a su temperatura de condensación, 102°C. Esta consideración conlleva que, por una parte, no

aparezca el problema de diseño mecánico antes descrito (excesiva relación L/D), y además el caudal de este refrigerante no sea excesivo, 4,116 kg/s.

#### 11.2.4. ( $U_G$ ), DIMENSIONES DEL REACTOR Y NÚMERO DE TUBOS.

Para el cálculo de estos parámetros se utilizará el método de Kern, como se ha citado anteriormente. Este método es un método iterativo que busca la optimización del diseño del intercambiador, en este caso del reactor. Para ello es necesario conocer todos los parámetros físicos de cada una de las corrientes (tanto la que circula por los tubos como el refrigerante), como son: capacidades caloríficas, densidades, viscosidades y en el caso de la corriente refrigerante, el calor latente. Para su determinación se utiliza el software Aspen Plus<sup>TM</sup> imponiendo las condiciones de trabajo seleccionadas.

Además, es necesario fijar, basándose en la normativa, un diámetro de tubo, así como el espesor y la longitud de estos.

<b>Dimensiones de los tubos R. Alquilación</b>	
Diámetro externo (cm)	2,54
Diámetro interno (cm)	2,19
Espesor (cm)	1.75E-01
Longitud (m)	6

**Tabla 5: Características de tubos R. Alquilación**

Con esto, y a partir del método, es posible determinar todos los parámetros mecánicos del reactor, utilizándose para su fabricación acero inoxidable AISI 316L, el cual es idóneo para procesos que puedan presentar corrosión al soportar elevadas temperatura y presión.

En la siguiente tabla se muestran los principales resultados del diseño mecánico del reactor siguiendo la normativa TEMA para intercambiadores de calor destinados a procesos químicos, y cuyo procedimiento detallado que está descrito en el anexo 2.:



<b>Diseño mecánico R. Alquilación</b>	
Diámetro de carcasa (m)	0,673
Número de tubos	498
Volumen (m <sup>3</sup> )	2,134
Longitud (m)	6
Pasos por tubo	1

**Tabla 6: Diseño mecánico R. Alquilación**

Atendiendo al cálculo del coeficiente global de transferencia de calor, hay que tener en cuenta que el proceso Kern es un proceso iterativo por lo cual es necesario fijar al inicio un coeficiente estándar y comprobar si el valor que resulta al final corresponde, o si es asumible el error, al dato tomado inicialmente.

Al inicio se tomó un coeficiente de  $350 \frac{W}{m^2K}$ , al final, después de varias iteraciones, se llegó a un valor de  $418 \frac{W}{m^2K}$ , valor donde convergen el dato supuesto y el calculado.

Este parámetro será necesario para el cálculo de la masa de catalizador necesaria en el proceso.

#### 11.2.5. MASA DE CATALIZADOR NECESARIA.

El último parámetro necesario para desarrollar el diseño del reactor de alquilación es la cantidad necesaria del catalizador para que se cumplan los objetivos previstos y cuyo procedimiento detallado que está descrito en el anexo 5. Para ello es necesario conocer la ecuación de diseño y la ecuación del balance de energía correspondientes a este tipo de reactor, las cuales son:

### ECUACIÓN DE DISEÑO

$$\frac{dW_t}{dX_A} = \frac{(w_{A,0})_t}{[-r'_A(T, X_A)]}$$

**Ecuación 1: Ecuación de diseño R. Alquilación.  
Froment, G.F., Bischoff, K.B. (1990)**

## BALANCE DE ENERGÍA

$$\frac{dT}{dX_A} = \left[ \frac{\Delta H}{v_A} + \frac{4U(T_R - T)}{\rho_L d_t (-r'_A)} \right] \frac{(w_{A,0})_t}{w_t C_{p,f}}$$

**Ecuación 2: Balance de Energía R. Alquilación.**  
**Froment, G.F., Bischoff, K.B. (1990)**

Ambas ecuaciones se resolverán simultáneamente ya que una depende de la otra. Dicha resolución se realizará mediante el método de integración numérica de Euler ya que ambas son ecuaciones diferenciales ordinarias. Dicho método, aun tratándose de un método de primer orden, proporciona valores cuyo error es asumible, si se toma un ancho de paso de iteración suficientemente pequeño.

Estas ecuaciones serán resueltas para un tubo del reactor, lo cual es aplicable para todos los tubos.

Utilizando este método se llega a que, para conseguir los objetivos propuestos, es necesaria una cantidad de 1,14 kg de zeolita  $\beta$  en partículas esféricas de 10 mm por cada tubo de reactor. Si se extiende esto a los 468 tubos que se disponen en el reactor, se concluye que son necesarios 534 kg de catalizador. El catalizador ocupa el 42% del volumen de los tubos aproximadamente, valor aceptable ya que las pérdidas de carga no serían excesivas y dicho valor se encuentra por debajo del máximo admisible (75%) para un ordenamiento de partículas esféricas al azar dentro de una conducción cilíndrica para un rango de valores  $D_p/D_{tubo}$  en el entorno de 0,3-0,7. Levenspiel, O. (1999).

### 11.2.6. CAIDA DE PRESIÓN EN EL REACTOR.

Uno de los aspectos más importantes en el diseño de un reactor empacado es la determinación de la caída de presión a la salida del reactor ya que caídas de presión elevadas puede originar problemas mecánicos en el diseño del reactor. Para determinar esto, se utiliza ecuaciones de mecánica de fluidos. En este caso se emplea la ecuación de Ergun para determinar dichas caídas de presión y comprobar si presentan un problema en el diseño del reactor.

La caída de presión del fluido por unidad de longitud de lecho será:

$$\frac{P_L - P_o}{L} = - \frac{G_s}{\rho * D_p} \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3} \left[ 150 \frac{(1 - \varepsilon)\mu}{D_p} + 1,75 * G_s \right]$$

Ecuación 3: Ecuación de Ergun. Hill, C.G. Ed. John  
Wiley & Sons (1979)

Aplicando la ecuación que se muestra en detalle en el anexo 6 se llega a que hay una caída de presión de 0,54 bar, es decir el reactor que en la entrada se encontraba a 35 bar de presión a la salida se encuentra a 34,46 bar de presión. Este descenso es mínimo y no afecta significativamente al trabajo del reactor por lo que no será necesario implementar un sistema de bombeo.

### 11.3. REACTOR DE TRANSALQUILACIÓN

Para llegar al grado de pureza requerido se introduce en el proceso otra etapa de reacción para transformar el DIPB formado en cumeno, al reaccionar con benceno recirculado de la etapa de separación.

## REACCIÓN DE TRANSALQUILACIÓN

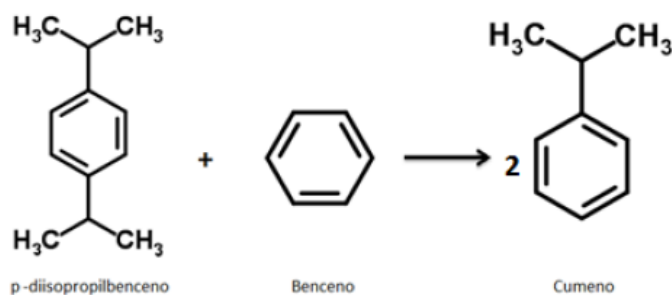


Figura 9: Reacción de Transalquilación

Al igual que en el reactor de alquilación, el diseño de este reactor está encaminado a conseguir la mayor extensión de la reacción de transalquilación posible para así conseguir el mayor grado de conversión del DIPB y garantizar la pureza requerida.

Dicho reactor sigue las mismas premisas y el mismo procedimiento empleado en el reactor de alquilación.

### 11.3.1. TEMPERATURA Y PRESIÓN EN EL REACTOR

Como se ha citado anteriormente la temperatura y la presión deben ser tales que favorezcan tanto la fase líquida de la reacción como el trabajo del catalizador para así obtener la cantidad y la pureza requerida de cumeno.

Es por esto que se selecciona, a partir de los datos de las patentes del proceso (Luyben W.L., 2010) una temperatura de entrada del reactor de 170 °C y una temperatura de salida de 220 °C, que se controlará mediante el fluido refrigerante, y una presión de 35 bar para garantizar así la fase líquida del proceso.

Este benceno recirculado procede de la etapa de separación, en la cual a la salida de esta el benceno pasa por un compresor que coloca a la corriente en las condiciones citadas de entrada al reactor, además de ponerse en contacto con el vapor de agua procedente del reactor de alquilación y de un precalentador que ponga a la corriente en la temperatura requerida.

### 11.3.2. CAUDAL DE BENCENO RECIRCULADO

Para garantizar la máxima conversión del DIPB en cumeno es necesario que todo el DIPB reaccione con el benceno. Para ello es necesario que este reactivo, el benceno, se encuentre en exceso respecto al cumeno ya que la estequiometría de los reactivos es 1:1.

A partir de los balances de materia realizados, se determina que en el reactor de transalquilación entran 0,315 kmol/h de DIPB.

Al ser esto así, se ha impuesto que la proporción de entrada al reactor de DIPB respecto al benceno sea de 1:10 para así asegurar la máxima conversión del DIPB en cumeno. Por lo tanto, el caudal de entrada al reactor será de 3,153 kmol/h de benceno de los 1945 kmol/h que se separan en la etapa de separación. Por tanto, solo el 0,162% será recirculado al reactor de transalquilación y 99,838% será llevado al reactor de alquilación lo cual nos reduce la cantidad de benceno nuevo que es necesario introducir al proceso.

### 11.3.3. TEMPERATURA DEL FLUIDO REFRIGERANTE.

Uno de los aspectos más importantes en el diseño de este reactor es la elección de un

refrigerante adecuado y de su temperatura ya que esta reacción, al igual que ocurría en la reacción de alquilación, es fuertemente exotérmica y es necesario controlar su gradiente de temperatura para que trabaje en las condiciones impuestas.

Dicho aspecto se calculará de la misma forma que en el reactor de alquilación, a través del método Kern, como en el reactor anterior.

Para la selección del refrigerante y su temperatura se hizo el mismo estudio que en el reactor de alquilación. En primer lugar, se consideró agua a 25°C, pero esto ocasionaba los mismos problemas mecánicos que en el reactor de alquilación.

Después de varios análisis se llega a la conclusión de que la mejor opción es la utilización de agua como refrigerante cerca de su temperatura de ebullición, 98 °C, saliendo como vapor próximo a su temperatura de condensación, 102 °C. Esto soluciona el problema mecánico, como en el reactor anterior. También provoca, ya que el aporte de calor latente es mucho mayor que el sensible, que el caudal de refrigerante utilizado sea mínimo, 25,2 kg/h.

#### 11.3.4. ( $U_G$ ), DIMENSIONES DEL REACTOR Y NÚMERO DE TUBOS

Para la obtención de estos parámetros se utilizará el método de Kern, como se ha citado anteriormente

Además, es necesario fijar, basándose en la normativa, un diámetro de tubo, así como el espesor y la longitud de estos.

<b>Dimensiones de los tubos R. Transalquilación</b>	
Diámetro externo (cm)	1,02
Diámetro interno (cm)	0,86
Espesor (cm)	0,08
Longitud (m)	1,75

**Tabla 7: Características de tubos R. Transalquilación**

Con esto, y a partir del método, es posible diseñar todos los parámetros mecánicos del reactor, utilizándose para su fabricación acero inoxidable AISI 316L, el cual es idóneo para procesos que puedan presentar corrosión al soportar elevadas temperatura y presión.

En la siguiente tabla se muestran los principales resultados del diseño mecánico del reactor siguiendo la normativa TEMA para intercambiadores de calor destinados a procesos químicos, y cuyo procedimiento detallado que está descrito en el anexo 2.:

<b>Diseño mecánico R. Transalquilación</b>	
Diámetro de carcasa (m)	0,218
Número de tubos	204
Volumen (m <sup>3</sup> )	0,065
Longitud (m)	1,75
Pasos por tubo	1

**Tabla 8: Diseño mecánico R. Transalquilación**

Se observa que las dimensiones de este reactor son bastante más pequeñas que las del reactor de alquilación. Esto es debido a que el diseño viene condicionado con la alimentación de DIPB proveniente de la salida del reactor de alquilación.

Atendiendo al cálculo del coeficiente global de transferencia de calor, hay que tener en cuenta que el proceso Kern es un proceso iterativo por lo cual es necesario fijar al inicio un coeficiente estándar y comprobar si el valor que resulta al final corresponde, o si es asumible el error, al dato tomado inicialmente.

Al inicio se tomó un coeficiente de  $60 \frac{W}{m^2K}$ , al final, después de múltiples iteraciones, se llegó a un valor de  $15,06 \frac{W}{m^2K}$ , valor donde convergen el dato supuesto y el calculado.

Este parámetro será necesario para el cálculo de la masa de catalizador necesaria en el proceso.

#### **11.3.5. MASA DE CATALIZADOR NECESARIA.**

El último parámetro necesario para terminar el diseño del reactor de transalquilación es la cantidad necesaria del catalizador para que se cumplan los objetivos previstos y cuyo procedimiento detallado que está descrito en el anexo 5. Para ello es necesario conocer la

ecuación de diseño y la ecuación del balance de energía correspondientes a este tipo de reactor, las cuales son:

### **ECUACIÓN DE DISEÑO**

$$\frac{dW_t}{dX_A} = \frac{(w_{A,0})_t}{[-r'_A(T, X_A)]}$$

**Ecuación 3: Ecuación de diseño R. Transalquilación  
Froment, G.F., Bischoff, K.B. (1990)**

### **BALANCE DE ENERGÍA**

$$\frac{dT}{dX_A} = \left[ \frac{\Delta H}{v_A} + \frac{4U(T_R - T)}{\rho_L d_t (-r'_A)} \right] \frac{(w_{A,0})_t}{w_t C_{p,f}}$$

**Ecuación 4: Balance de Energía R. Transalquilación  
Froment, G.F., Bischoff, K.B. (1990)**

Ambas ecuaciones se resolverán simultáneamente ya que una depende de la otra. Dicha resolución se realizará mediante el método de integración numérica de Euler ya que ambas son ecuaciones diferenciales ordinarias. Dicho método, aun tratándose de un método de primer orden, proporciona valores cuyo error es asumible, siempre que se utilice un ancho de paso de iteración suficientemente pequeño.

Estas ecuaciones serán resueltas para un tubo del reactor lo cual es aplicable para todos los tubos.

Aplicando el método, se llega a que, para conseguir los objetivos propuestos, es necesaria una cantidad de 0,06 kg de zeolita  $\beta$  en partículas esféricas de 3 mm de diámetro, por cada tubo de reactor. Extendiendo estos resultados a los 204 tubos que se disponen en el reactor, se concluye que son necesarios 12,2 kg de catalizador. El catalizador ocupa el 48 % de los tubos aproximadamente, valor aceptable ya que las pérdidas de carga no serían excesivas y dicho valor se encuentra por debajo del máximo admisible (75%) para un

ordenamiento de partículas esféricas al azar dentro de una conducción cilíndrica para un rango de valores  $D_p/D_{tubo}$  en el entorno de 0,3-0,7. Levenspiel, O. (1999).

Uno de los aspectos más importantes en el diseño de un reactor empacado es la determinación de la caída de presión a la salida del reactor ya que caídas de presión elevadas puede originar problemas mecánicos en el diseño del reactor. Para determinar esto, se utiliza ecuaciones de mecánica de fluidos. En este caso se emplea la ecuación de Ergun para determinar dichas caídas de presión y comprobar si presentan un problema en el diseño del reactor.

#### 11.3.6. CAÍDA DE PRESIÓN EN EL REACTOR

La caída de presión del fluido por unidad de longitud de lecho será:

$$\frac{P_L - P_o}{L} = - \frac{G_s}{\rho * D_p} \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3} \left[ 150 \frac{(1 - \varepsilon)\mu}{D_p} + 1,75 * G_s \right]$$

**Ecuación 3: Ecuación de Ergun. Hill, C.G. Ed. John  
Wiley & Sons (1979)**

Aplicando la ecuación que se muestra en detalle en el anexo 7 se llega a que hay una caída de presión de 0,29 bar, es decir el reactor que en la entrada se encontraba a 35 bar de presión a la salida se encuentra a 34,71 bar de presión. Este descenso es mínimo y no afecta significativamente al trabajo del reactor por lo que no será necesario implementar un sistema de bombeo.

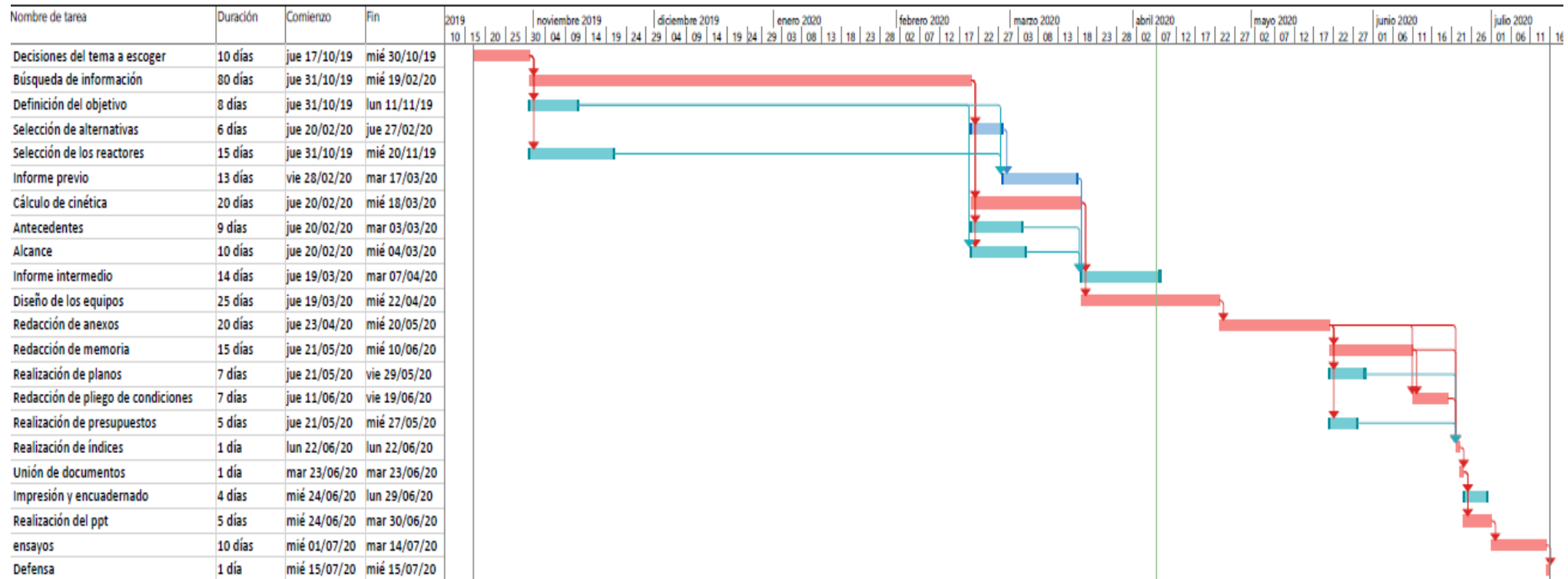


## 12. PLANIFICACIÓN

Para completar este TFG se necesita realizar una planificación acerca de la materialización y creación del mismo. Por tanto, se ha realizado una lista con las diferentes actividades realizadas en el tiempo con su correspondiente diagrama de Gantt.

Las actividades marcadas en rojo en el diagrama de Gantt son aquellas que se encuentran dentro del camino crítico, el cual representa aquellas actividades que deben cumplirse dentro de la planificación fijada ya que de no ser así provocaría demoras en la elaboración del TFG.

# DISEÑO DE UN PROCESO DE PRODUCCIÓN DE CUMENO MEDIANTE UN REACTOR DE ALQUILACIÓN Y UN REACTOR DE TRANSALQUILACIÓN CATALÍTICOS.



También se elabora la planificación de todas las tareas una vez expuesto el proyecto. Para ello se realizará otra tabla donde se muestran las diferentes actividades que hay que realizar hasta que se pone en marcha el proyecto.

Nombre de tarea	Duración	Comienzo	Fin
Aprobación del proyecto	15 días	mar 01/09/20	lun 21/09/20
Análisis del Proyecto para su construcción	14 días	mar 22/09/20	vie 09/10/20
Preparación del terreno	7 días	lun 12/10/20	mar 20/10/20
Ofertas para la compra y fabricación de equipos y material necesario	11 días	lun 12/10/20	lun 26/10/20
Compra de equipos no catalogable	5 días	mar 27/10/20	lun 02/11/20
Fabricación de reactores	25 días	mar 03/11/20	lun 07/12/20
Fabricación de unidades de separación	30 días	mar 03/11/20	lun 14/12/20
Fabricación de tuberías	10 días	mar 03/11/20	lun 16/11/20
Fabricación de intercambiadores	15 días	mar 03/11/20	lun 23/11/20
Compra de equipos de catálogo	4 días	mar 27/10/20	vie 30/10/20
Transporte de reactores	5 días	mar 08/12/20	lun 14/12/20
Transporte de unidades de separación	5 días	mar 15/12/20	lun 21/12/20
Transporte de tuberías	3 días	mar 17/11/20	jue 19/11/20
Transporte de intercambiadores de calor	5 días	mar 24/11/20	lun 30/11/20
Instalación de reactores	16 días	mar 15/12/20	mar 05/01/21
Instalación de unidades de separación	18 días	mar 22/12/20	jue 14/01/21
Instalación de tuberías	3 días	vie 20/11/20	mar 24/11/20
Instalación de intercambiadores de calor	7 días	mar 01/12/20	mié 09/12/20
Presupuesto de los accesorios requeridos	8 días	lun 12/10/20	mié 21/10/20
Compra de los accesorios	2 días	jue 22/10/20	vie 23/10/20
Transporte de los accesorios	2 días	lun 26/10/20	mar 27/10/20
Instalación de los accesorios	3 días	mié 28/10/20	vie 30/10/20
Instalación eléctrica	10 días	lun 02/11/20	vie 13/11/20
Pruebas eléctricas	5 días	lun 16/11/20	vie 20/11/20
Pruebas hidráulicas	10 días	lun 02/11/20	vie 13/11/20
Pruebas del proceso	5 días	lun 16/11/20	vie 20/11/20
Estudio de los resultados	1 día	lun 23/11/20	lun 23/11/20
Elaboración del informe	1 día	mar 24/11/20	mar 24/11/20
Recepción del proyecto	1 día	mié 25/11/20	mié 25/11/20
Puesta en marcha del proyecto	1 día	lun 16/11/20	lun 16/11/20

# DOCUMENTO 2: ANEXOS

## Contenido

<b>ANEXO 1: BALANCES DE MATERIA .....</b>	<b>3</b>
<b>1.1. ECUACIÓN GENERAL DEL BALANCE DE MATERIA.....</b>	<b>3</b>
<b>1.2. BALANCE DE MATERIA GLOBAL.....</b>	<b>4</b>
<b>1.3. BALANCE DE MATERIA AL REACTOR DE ALQUILACIÓN.....</b>	<b>5</b>
<b>1.3.1. ENTRADA AL REACTOR .....</b>	<b>6</b>
<b>1.3.2. SALIDA DEL REACTOR.....</b>	<b>6</b>
<b>1.4. BALANCE DE MATERIA AL SEPARADOR 1 .....</b>	<b>9</b>
<b>1.5. BALANCE DE MATERIA AL REACTOR DE TRANSALQUILACIÓN.....</b>	<b>10</b>
<b>1.5.1. ENTRADA AL REACTOR .....</b>	<b>11</b>
<b>1.5.2. SALIDA DEL REACTOR.....</b>	<b>11</b>
<b>1.6. BALANCE DE MATERIA AL SEPARADOR 2 .....</b>	<b>13</b>
<b>1.6.1. ENTRADA AL SEPARADOR.....</b>	<b>13</b>
<b>1.6.2. SALIDA AL SEPARADOR.....</b>	<b>14</b>
<b>1.7. BALANCE DE MATERIA EN LA ENTRADA DEL SISTEMA .....</b>	<b>15</b>
<b>1.8. BALANCE DE MATERIA AL SEPARADOR 3 .....</b>	<b>16</b>
<b>ANEXO 2. DISEÑO MECÁNICO Y TERMODINÁMICO DEL REACTOR DE ALQUILACIÓN .....</b>	<b>17</b>
<b>2.1. SELECCIÓN DE LAS DIMENSIONES DE LOS TUBOS .....</b>	<b>18</b>
<b>2.2. CAUDAL DE REFRIGERANTE NECESARIO .....</b>	<b>18</b>
<b>2.3. DISEÑO MECÁNICO DEL REACTOR Y CÁLCULO DE U. ....</b>	<b>20</b>
<b>2.4. DISEÑO TERMODINÁMICO DEL REACTOR.....</b>	<b>24</b>
<b>ANEXO 3. DISEÑO MECÁNICO Y TERMODINÁMICO DEL REACTOR DE TRANSALQUILACIÓN ..</b>	<b>30</b>
<b>3.1. SELECCIÓN DE LAS DIMENSIONES DE LOS TUBOS .....</b>	<b>30</b>
<b>3.2. CAUDAL DE REFRIGERANTE NECESARIO.....</b>	<b>30</b>
<b>3.3. DISEÑO MECÁNICO DEL REACTOR Y CÁLCULO DE U. ....</b>	<b>32</b>
<b>3.4. DISEÑO TERMODINÁMICO DEL REACTOR.....</b>	<b>36</b>
<b>ANEXO 4. CÁLCULO DE LA MASA DE CATALIZADOR NECESARIA EN EL REACTOR DE ALQUILACIÓN .....</b>	<b>42</b>
<b>ANEXO 5. CÁLCULO DE LA MASA DE CATALIZADOR NECESARIA EN EL REACTOR DE TRANSALQUILACIÓN .....</b>	<b>47</b>
<b>ANEXO 6. CÁLCULO DE LA CAÍDA DE PRESIÓN EN EL REACTOR DE ALQUILACIÓN.....</b>	<b>52</b>
<b>ANEXO 7. CÁLCULO DE LA CAÍDA DE PRESIÓN EN EL REACTOR DE TRANSALQUILACIÓN.....</b>	<b>54</b>
<b>ANEXO 8. FICHAS DE SEGURIDAD DE LOS REACTIVOS.....</b>	<b>56</b>
<b>PROPILENO .....</b>	<b>56</b>
<b>BENCENO .....</b>	<b>57</b>
<b>PROPANO.....</b>	<b>59</b>

<b>ANEXO 9. FICHAS DE SEGURIDAD DE LOS PRODUCTOS.....</b>	<b>60</b>
<b>CUMENO .....</b>	<b>60</b>
<b>DIPB .....</b>	<b>62</b>

## ANEXO 1: BALANCES DE MATERIA

Para diseñar y dimensionar las unidades es necesario realizar un análisis de las corrientes que intervienen en el proceso y así poder verificar que en todo momento se opera en régimen estacionario. Este análisis se realiza mediante los pertinentes balances de materia a las corrientes de entrada y salida de las diferentes unidades del proceso.

En la siguiente imagen se muestra el diagrama del proceso con las corrientes de materia numeradas para su análisis:

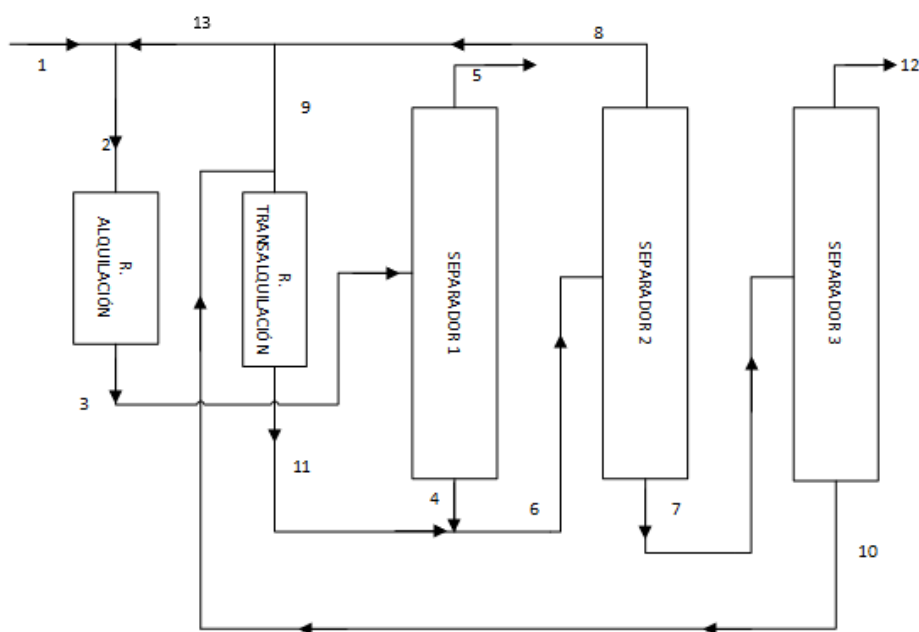


Ilustración 1: Diagrama de bloques del proceso

### 1.1. ECUACIÓN GENERAL DEL BALANCE DE MATERIA

La ecuación general de balance de materia aplicado es la siguiente:

$$(A) = (E) - (S) + (G) - (C)$$

Ecuación general de balance de materia

Siendo:

- (A): Término de acumulación.
- (E): Término de entrada al sistema
- (S): Término de salida del sistema
- (G): Término de generación por reacción química

- (C): Término de consumo por reacción química

Dicha ecuación se utilizará en todos los balances pertinentes en nuestro sistema eliminándose los que sean necesarios dependiendo del carácter del equipo o corriente que se esté estudiando.

## 1.2. BALANCE DE MATERIA GLOBAL

Lo primero que es necesario conocer es el caudal de reactivo necesario para llegar al objetivo de caudal de producto que se impone, para ello se realiza un balance global al sistema sin tener en cuenta lo que ocurre dentro de dicho sistema. Por tanto, al no considerarse reacción química y encontrarse en estado estacionario el balance de materia queda de la siguiente forma:

$$(E) = (S)$$

Puesto que el reactivo limitante es el propileno, este balance se hará en función solo de él ya que al ser el reactivo limitante es aquel que marca el rendimiento del proceso.

Para comenzar se calcula el caudal molar de cumeno que sale del sistema a partir del dato de caudal producto que se impuso en la propuesta, 500.000 t/año

$$\begin{aligned} & 500.000 \frac{t}{\text{año}} * \frac{1.000kg}{1 t} * \frac{1 \text{ año}}{357 \text{ días}} * \frac{1 \text{ día}}{24h} * \frac{1 \text{ mol cumeno}}{120,19 \text{ kg cumeno}} \\ & = 485 \frac{kmol}{h} \text{ cumeno} \end{aligned}$$

A partir de esto y con el balance de materia, se concluye que:

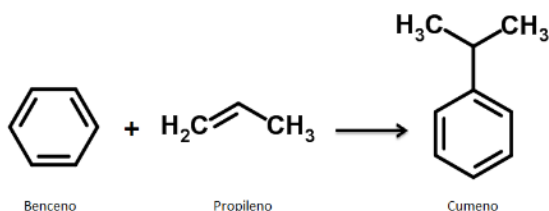
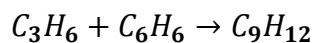
$$(E) = 485,54 \frac{kmol}{h} \text{ propileno}$$



### 1.3. BALANCE DE MATERIA AL REACTOR DE ALQUILACIÓN

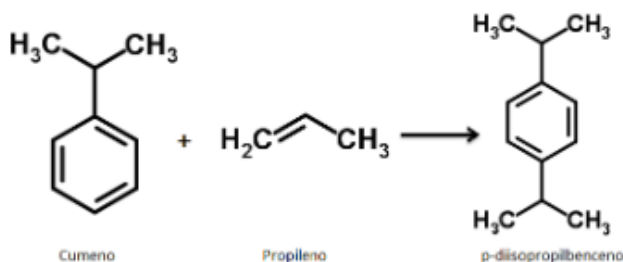
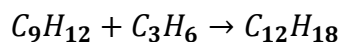
Las reacciones que se producen en el reactor de alquilación son las que se muestran:

#### 1- Reacción de Alquilación: Producción de cumeno



**Reacción principal de alquilación**

#### 2- Reacción de Polialquilación: Producción de diisopropilbenceno (DIPB)



**Reacción secundaria de polialquilación**

Ya que el sistema se encuentra en estado estacionario se elimina el término de acumulación en dicho sistema, quedando el balance de materia de la siguiente forma:

$$(E) + (G) = (S) + (C)$$

### 1.3.1. ENTRADA AL REACTOR

Las características de la corriente de alimentación del reactor en fase líquida son las siguientes:

Tabla A.1.1: Alimentación del R. de Alquilación. Corriente 2		
	Caudal (kmol/h)	Fracción molar
Propileno	485,54	0,166
Propano	24,277	0,008
Benceno	2427,7	0,826
Total	2937,517	1

La cantidad de benceno se impone en relación al propileno disponible ya que la estequiometría de la reacción principal es 1:1 propileno/benceno y es necesario que el benceno se encuentre en exceso para que todo el propileno desaparezca y así se reduzca la probabilidad de la segunda reacción. Es por ello que se toma una relación propileno/benceno 1:5 para garantizar dicha condición.

La corriente de propano viene impuesta por la proporción benceno:propileno ya que viene mezclado con el propileno proveniente de una planta de pirólisis, es por ello que al conocerse que esta corriente de propileno viene con un 5% de impureza de propano se conoce el caudal de propano que entra al sistema.

### 1.3.2. SALIDA DEL REACTOR

En este punto se considera que todo el propileno reacciona y por tanto se consume en su totalidad produciendo cumeno y DIPB como subproducto no deseado.

El balance se desglosa haciéndolo particular a cada compuesto para así conocer los caudales que salen del sistema de cada reactivo o producto.

### **BALANCE DE MATERIA AL PROPILENO**

Puesto que el sistema se encuentra en régimen estacionario y el propileno es uno de los reactivos que intervienen en el proceso el balance de materia respecto a este reactivo es el siguiente:

$$(E) = (S) + (C)$$

Puesto que todo el propileno es consumido se traduce que no hay propileno en la salida de nuestro sistema, esto quiere decir que:

$$(E) = (C)$$

$$(C) = 485,54 \frac{kmol}{h} \text{ propileno}$$

$$(S) = 0$$

### **BALANCE DE MATERIA AL PROPANO**

Ya que este compuesto se trata de un inerte en las condiciones de proceso, es decir, que no reacciona en el sistema, el balance de materia para este compuesto queda de la siguiente forma:

$$(E) = (S)$$

$$(S) = 24,277 \frac{kmol}{h} \text{ propano}$$

### **BALANCE DE MATERIA AL BENCENO**

El benceno es el reactivo que se mantiene en exceso, por tanto, lo que se consume de benceno será la misma cantidad que lo se consume de propileno menos el propileno convertido en DIPB, quedando el balance de materia de la siguiente forma:

$$(E) = (S) + (C)$$

$$\begin{aligned} & 2425 \frac{kmol}{h} \text{ benceno} \\ &= (S) + 485,54 * (0,9987) + 485,54 * \left(\frac{0,0013}{2}\right) \frac{kmol}{h} \text{ benceno} \end{aligned}$$

$$(S) = 1942,48 \frac{kmol}{h} \text{ benceno}$$

Dicha corriente de salida del reactor se separará de la corriente principal en una etapa de separación.

### **BALANCE DE MATERIA AL CUMENO**

Para conocer la cantidad de cumeno que sale del reactor no sólo es necesario considerar el balance, sino que también será necesario prestarle atención a la selectividad de la reacción principal con el catalizador utilizado.

Puesto que la selectividad de la reacción principal es de 99,87% se concluye que en el balance habrá que tener en cuenta este dato ya que sólo el 99,87% del propileno reaccionado producirá cumeno, el 0,13% restante producirá DIPB.

El balance quedará de la siguiente forma:

$$(S) = (G)$$

$$(G) = 485,54 * 0,9987 = 484,91 \frac{kmol}{h} \text{ cumeno}$$

$$(S) = 484,91 \frac{kmol}{h} \text{ cumeno}$$

### **BALANCE DE MATERIA AL DIPB**

En este punto se tendrá en cuenta también la selectividad de la reacción de polialquilación como se citó anteriormente, quedando el balance de materia de la siguiente forma:

$$(S) = (G)$$

$$(G) = 485,54 * \left(\frac{0,0013}{2}\right) = 0,3156 \frac{kmol}{h} \text{ DIPB}$$

$$(S) = 0,3156 \frac{kmol}{h} \text{ DIPB}$$

Todos estos datos de salida quedan resumidos en la siguiente tabla:

Tabla A.1.2: Salida del R. de Alquilación Corriente 3		
	Caudal (kmol/h)	Fracción molar
Propileno	0	0
Propano	24,277	0,00990
Benceno	1942,5	0,792
Cumeno	484,91	0,198
DIPB	0,31560	0,000129
Total	2452	1

#### 1.4. BALANCE DE MATERIA AL SEPARADOR 1

En este punto lo que se hará será separar el propano de la corriente principal, ya que el propano presenta el punto de ebullición más bajo de todos los compuestos estudiados, será este el que se separe por la cabeza de la columna de rectificación.

Puesto que el alcance de este TFG no engloba el diseño de las columnas, se realizarán los balances suponiendo que la separación de los compuestos será total, destinándose así el propano su utilización como combustible en otro proceso de la planta.

El balance de la columna, al no existir reacción química y encontrándose en estado estacionario, será el siguiente:

$$(E) = (S)$$

Ya que la corriente de entrada a la columna será la misma que la de la salida del reactor no realizaremos el balance para cada uno de los compuestos si no que se mostrará una tabla dónde se muestren los caudales de cabezas y de colas de la columna.

### CAUDAL POR CABEZA DE COLUMNA

Como se ha descrito anteriormente, por la cabeza de la columna saldrá todo el propano que será destinado a su utilización como combustible. Por tanto, el caudal de la siguiente corriente se muestra en la siguiente tabla:

Tabla A.1.3: Salida por cabeza columna 1		
Corriente 5		
	Caudal (kmol/h)	Fracción molar
Propano	24,277	1
total	24,277	1

### CAUDAL POR COLA DE COLUMNA

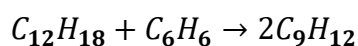
En este punto se realizará el balance haciendo la suposición de que nada de propano sale por la cola de la columna y que nada de los demás compuestos salen por la cabeza de dicha columna. Conociendo esto el caudal de la siguiente corriente se resume en la siguiente tabla:

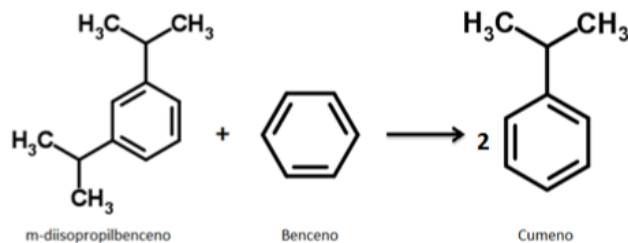
Tabla A.1.4: Salida por cola columna 1		
Corriente 4		
	Caudal (kmol/h)	Fracción molar
Cumeno	484,9	0,19974
DIPB	0,315	0,00013
Benceno	1942.476	0,8
Total	2427,7	1

## 1.5. BALANCE DE MATERIA AL REACTOR DE TRANSALQUILACIÓN

Ya que la corriente que entra al separador 2 se mezcla con la de salida del reactor de transalquilación es necesario realizar a priori su balance para poder proseguir con el resto de unidades del proceso.

La reacción que se produce en el reactor es la siguiente:





### 1.5.1. ENTRADA AL REACTOR

Como se ha tomado la consideración de que todas las unidades de separación tengan una eficacia del 100% conocemos los caudales de entrada al reactor de transalquilación los cuales se muestran en la siguiente tabla:

Tabla A.1.5: Entrada al reactor de Transalquilación Corriente 14		
	Caudal (kmol/h)	Fracción molar
DIPB	0,315	0,090
Benceno	3,156	0,909
Total	3,471	1

La estequiometría DIPB/Benceno es de 1:1 a que se pretende que se consuma todo el DIPB, además de utilizar el catalizador para mejorar su selectividad, se introduce un exceso de benceno de 1:10 respecto al DIPB para asegurar que la conversión de DIPB sea total. Esto hace que el resto del benceno separado en la etapa de separación sea recirculado al reactor de alquilación necesitando así menos reactivo nuevo en la entrada del proceso.

### 1.5.2. SALIDA DEL REACTOR

Igual que en el reactor de alquilación se elimina del balance de materia el término de acumulación ya que el sistema se encuentra en estado estacionario, quedando de la siguiente forma:

$$(E) + (G) = (S) + (C)$$

De la misma forma se procede a hacer el balance para cada uno de los reactivos y productos que intervienen en la reacción.

### **BALANCE DE MATERIA AL DIPB**

Al tratarse de un reactivo y considerándose que la reacción es completa el balance de materia queda de la siguiente forma:

$$(E) = (S) + (C)$$

$$(C) = 0,631 \frac{kmol}{h} \text{ DIPB}$$

$$(S) = 0$$

### **BALANCE DE MATERIA AL BENCENO**

De la misma forma, al tratarse el benceno del reactivo que se encuentra en exceso el balance referido a este compuesto será:

$$(E) = (S) + (C)$$

Lo que se consume de benceno será lo mismo que se consume de DIPB ya que la estequiometría de esta reacción es de 1:1, por tanto:

$$(S) = (E) - (C)$$

$$(S) = 3,156 - 0,315$$

$$(S) = 2,840 \frac{kmol}{h}$$

Esta corriente se mezcla con la salida por cola del separador 1 para la posterior separación en el separador 2 del benceno.

### **BALANCE DE MATERIA AL CUMENO**

El único compuesto que se produce en este reactor es el cumeno, el cual al igual que el benceno se mezcla con la corriente de salida por cola del separador 1. El balance para este compuesto en el separador será el siguiente:

$$(S) = (G)$$

Ya que la estequiometría DIPB/cumeno de esta reacción es 1:2 lo que se produce de cumeno es dos veces lo que se consume de DIPB, por tanto, el balance queda:

$$(G) = 2 * 0,315 = 0,631 \frac{kmol}{h} \text{ cumeno}$$



$$(S) = 0,631 \frac{kmol}{h} \text{ cumeno}$$

La siguiente tabla muestra las corrientes de salida del reactor:

<b>Tabla A.1.6: Salida del reactor de Transalquilación Corriente 11</b>		
	Caudal (kmol/h)	Fracción molar
Cumeno	0,631	0,181
Benceno	2,840	0,818
Total	3,471	1

## 1.6. BALANCE DE MATERIA AL SEPARADOR 2

En esta columna se separa el benceno del sistema para recircularlo al reactor de alquilación y al de transalquilación.

### 1.6.1. ENTRADA AL SEPARADOR

El balance de materia en este punto, al encontrarse en estado estacionario y al no presentarse reacción química, será el siguiente:

$$(E) = (S)$$

Se muestra una tabla donde se adhiere la corriente de salida del reactor a la de salida por cola de la unidad de separación 1 las cuales entran al separador 2 quedando de la siguiente forma:

<b>Tabla A.1.7: Entrada a la columna 2 Corriente 6</b>		
	Caudal (kmol/h)	Fracción molar
Cumeno	485,54	0,199
Benceno	1945,31	0,800
DIPB	0,315	0,000259
Total	2431,171	1

### 1.6.2. SALIDA AL SEPARADOR

Al igual que en la columna 1, se hace la consideración de que la separación es total distinguiéndose una corriente de benceno que sale por cabeza y otra con el resto de compuestos que sale por cola.

#### **CAUDAL POR CABEZA DE COLUMNA**

La tabla que refleja el caudal que sale por esta corriente y que es recirculada al sistema para su reutilización en ambos reactores es la siguiente:

Tabla A.1.8: Salida por cabeza columna 2 Corriente 8		
	Caudal (kmol/h)	Fracción molar
Benceno	1945,316	1
Total	1945,316	1

#### **CAUDAL POR COLA DE COLUMNA**

La siguiente tabla refleja el caudal que sale por la cola de la columna 2 y que es llevado a la columna 2 para separar el resto de componentes:

Tabla A.1.9: Salida por cola columna 2 Corriente 7		
	Caudal (kmol/h)	Fracción molar
Cumeno	485,54	0,9994
DIPB	0,315	0,0006
Total	485,855	1

### 1.7. BALANCE DE MATERIA EN LA ENTRADA DEL SISTEMA

Ya que el benceno proveniente de la columna 2 es recirculado al sistema, es necesario realizar un balance donde se conozca la cantidad que se recircula al reactor de alquilación y al de transalquilación para así conocer la cantidad de benceno nuevo que se recircula al sistema.

Ya que, en este caso no hay reacción química y el sistema se encuentra en régimen estacionario, el balance de materia queda de la siguiente forma:

$$(E) = (S)$$

Para conocer lo que se recircula al reactor de alquilación lo primero es conocer que parte de este caudal es recirculado al reactor de transalquilación. Sabemos que este caudal es de 3,156 kmol/h por la consideración anteriormente señalada, por tanto, el balance queda:

Tabla A.1.10: Recirculación de benceno al sistema Corriente 13		
	Caudal (kmol/h)	Fracción molar
Benceno Transalquilación	3,156	0,004
Benceno alquilación	1942,16	0,996
Total	1945,31	1

Sabiendo esto se aplica el balance a la entrada del sistema quedando de la siguiente forma:

$$(E)_{nueva} = (S) - (E)_{recir}$$

$$(E)_{nueva} = 2427,7 - 1942,16$$

$$(E)_{nueva} = 485,54 \frac{kmol}{h}$$

La siguiente tabla muestra las corrientes que entran a nuestro proceso:

Tabla A.1.11: Entrada al proceso Corriente 1		
	Caudal (kmol/h)	Fracción molar
Propileno	485,54	0,488
Propano	24,277	0,0244
Benceno nuevo	485,54	0,488
Total	995,357	1

## 1.8. BALANCE DE MATERIA AL SEPARADOR 3

Se vuelve a aplicar la consideración de que nos encontramos en régimen estacionario y que no ocurre reacción, es por ello que el balance vuelve a quedar:

$$(E) = (S)$$

Se realiza de nuevo por separado las corrientes de cola y de cabeza. La corriente de cumeno sale por cabeza y la corriente de DIPB sale por la cola de la columna la cual es recirculada al reactor de transalquilación.

### CAUDAL POR COLA DE COLUMNA

En la siguiente tabla se muestra el caudal de DIPB que sale por la cola de la columna:

Tabla A.1.12 : Salida por cola columna 3		
	Caudal (kmol/h)	Fracción molar
DIPB	0,315	1
Total	0,315	1

### CAUDAL POR CABEZA DE COLUMNA

En la siguiente tabla se muestra el caudal de DIPB que sale por la cola de la columna:

Tabla A.1.13: Salida por CABEZA columna 3		
	Caudal (kmol/h)	Fracción molar
Cumeno	485,54	1
Total	485,54	1

## ANEXO 2. DISEÑO MECÁNICO Y TERMODINÁMICO DEL REACTOR DE ALQUILACIÓN

El tipo de reactor seleccionado es un reactor multitubular catalítico con refrigeración por el lado de la carcasa y la reacción por el lado de los tubos. Esto se debe a que el carácter de la reacción es fuertemente exotérmico y usando otros tipos de reactores se tendría el problema de que se establecería un perfil de temperatura no solo axial, sino que también en la dirección radial del reactor lo cual dificultaría el diseño del reactor ya que esto provocaría incluir en el diseño un modelo bidimensional pero sobre todo dificultaría el control de la operación.

Es pues que para solucionar estos inconvenientes se selecciona este tipo de reactor multitubular. Por añadidura, el empleo de este tipo de reactores, similares en estructura y concepción a un intercambiador de calor del tipo carcasa y tubos, permite el aprovechamiento energético del calor desprendido.

El diseño mecánico del reactor va ligado a la termodinámica del mismo. Al tratarse de un reactor conformado como un intercambiador de calor de carcasa y tubos, su diseño mecánico se aborda de la misma forma en la que se diseñaría este tipo de intercambiador.

Aunque hay muchos otros, el método más utilizado en la industria química para este tipo de diseño es el método de Kern (Da Silva Sá Ravagnani, M. A., Caballero Suárez, J. A., *Redes de Cambiadores de Calor*, 2012), el cual se trata de un método iterativo que busca el diseño más óptimo de dicho reactor/intercambiador.

El método de Kern se basa en los siguientes aspectos:

- 1- Se selecciona un diámetro de tubo y una longitud de tubo.
- 2- Se calcula el caudal de refrigerante necesario para llevar a cabo el proceso.
- 3- Se selecciona un valor de  $U$ , el cual será el valor que tendremos que iterar.
- 4- Se calculan los parámetros mecánicos del reactor o intercambiador.
- 5- Se calculan las resistencias a la transmisión de calor que se presenten.
- 6- Se vuelve a calcular el valor de  $U$ .

## 2.1. SELECCIÓN DE LAS DIMENSIONES DE LOS TUBOS

Como indica Luyben, W.L. (2010), en la patente citada, el diámetro de los tubos y la longitud de estos se muestran en la siguiente tabla:

<b>Tabla A.2.1: Dimensiones de los tubos R. Alquilación</b>	
Diámetro externo (cm)	2,54
Diámetro interno (cm)	2,19
Espesor (cm)	1.75E-01
Longitud (m)	6

Dichos valores además de estar regidos por la patente previamente citada, se encuentran bajo la normativa TEMA específica para reacciones de este carácter. Se ha preferido comenzar el cálculo utilizando una suposición de dimensiones de los tubos basada en un sistema específicamente desarrollado para el proceso diseñado en este trabajo.

## 2.2. CAUDAL DE REFRIGERANTE NECESARIO

Siguiendo el método citado, a continuación, se realiza un balance de energía entre el fluido caliente y el refrigerante:

$$Q_{cedido} = Q_{absorbido}$$

Los datos necesarios de las diferentes corrientes se muestran en las siguientes tablas:

<b>Tabla A.2.2: Datos de la corriente caliente</b>	
Caudal másico (kg/s)	58,578
Capacidad calorífica (J/Kg*K)	2366,91
Temperatura de entrada (°C)	170
Temperatura de salida (°C)	237
Densidad (kg/m³)	657,081
Viscosidad (Pa*s)	1,22E-07
Conductividad térmica (W/m*K)	0,088

Tabla A.2.3: Datos de la corriente fría	
Calor latente (J/kg)	2257000
Capacidad calorífica (J/Kg*K)	2029
Temperatura de entrada (°C)	98
Temperatura de salida (°C)	102
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	0,598
Viscosidad (Pa*s)	1,23E-05
Conductividad térmica (W/m*K)	0,025

Estos datos son obtenidos del software Aspen Plus<sup>TM</sup> en las condiciones de trabajo.

La temperatura de entrada y salida del refrigerante son aquellas que pueda considerarse que el refrigerante trabaja en prácticamente isotérmico, ya que al variar la temperatura de refrigeración se tendría que tener en cuenta el perfil de dicha temperatura y complicaría demasiado el diseño del reactor. Además, al utilizar calores sensibles el salto térmico es demasiado pequeño y produce que el diseño no sea viable mecánicamente.

En un análisis previo se intenta que el fluido refrigerante trabaje de forma isotérmica, pero sin que exista cambio de fase en dicho fluido, esto, como también se ha citado anteriormente, crea problemas en el diseño mecánico de la columna además de ser necesario un caudal de refrigerante muy elevado. Dichos problemas mecánicos son en definitiva valores de L/D muy inusuales ya que este parámetro toma valores muy elevados y el reactor tendría pocos tubos y de una longitud inmensa lo que no es viable dentro de la industria.

Por ello, después de estos estudios se llega a la conclusión que es necesario utilizar un sistema de intercambio de calor que opere en un rango de temperaturas que produzca la vaporización del agua, implicando el calor latente de vaporización en la operación, esto soluciona ambos problemas ya que los calores latentes son mucho mayores que los calores sensibles y esto soluciona el problema del salto térmico acercando el comportamiento del refrigerante más a la isothermicidad. Además, esto hace que el perfil de temperatura del fluido refrigerante se pueda despreciar y tomar una temperatura media entre la entrada y la salida y considerar que el fluido refrigerante se comporta de forma isotérmica.

El fluido seleccionado es agua que entra a 1 atm de presión y a la temperatura anteriormente citada. Sabiendo esto se prosigue con el método.

$$Q_{cedido} = Q_{absorbido}$$

$$\dot{m}_c * C_{p,c} * \Delta T = \dot{m}_f * L_v$$

$$58,578 * 2366,91 * (237 - 170) = \dot{m}_c * L_v$$

$$9,3 * 10^6 \text{ W} = \dot{m}_f * L_v$$

$$\dot{m}_f = \frac{9,3 * 10^6}{2257000} = 4,116 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

### 2.3. DISEÑO MECÁNICO DEL REACTOR Y CÁLCULO DE U.

Una vez determinado los caudales de cada corriente se procede con el diseño mecánico del reactor.

Para comenzar se selecciona un valor de coeficiente de transferencia de calor ( $U_o$ ), con dicho valor se calculará el área necesaria de intercambio de calor y a partir de ello todos los parámetros mecánicos que conllevan al diseño del reactor.

El valor inicial de  $U_o$ , tal y como aconseja el método Kern, se toma a partir de la siguiente gráfica obtenida del libro *Principios de la Transferencia de Calor* (Frank Kreith), para así conseguir afinar el valor desde el inicio de la forma más exacta posible:



**TABLA 8.5** Coeficientes globales de transferencia de calor aproximados para estimaciones preliminares

Trabajo	Coeficiente global, $U$	
	(Btu/h ft <sup>2</sup> °F)	(W/m <sup>2</sup> K)
Vapor a agua		
calentador instantáneo	400-600	2 270-3 400
calentador de tanque de almacenamiento	175-300	990-1 700
Vapor a aceite		
combustible <b>pesado</b>	10-30	57-170
combustible ligero	30-60	170-340
destilado de petróleo ligero	50-200	280-1 130
Vapor a soluciones acuosas	100-600	570-3 400
Vapor a gases	5-50	28-280
Agua a aire comprimido	10-30	57-170
Agua a agua, enfriadores con camisa de agua	150-275	850-1 560
Agua a aceite lubricante	20-60	110-340
Agua a vapores de aceite en condensación	40-100	220-570
Agua a alcohol en condensación	45-120	255-680
Agua a Freón-12 en condensación	80-150	450-850
Agua a amoníaco en condensación	150-250	850-1 400
Agua a solventes orgánicos, alcohol	50-150	280-850
Agua a Freón-12 en ebullición	50-150	280-850
Agua a gasolina	60-90	340-510
Agua a gasóleo o destilado	35-60	200-340
Agua a salmuera	100-200	570-1 130
Orgánicos ligeros a orgánicos ligeros	40-75	220-425
Orgánicos medios a orgánicos medios	20-60	110-340
Orgánicos pesados a orgánicos pesados	10-40	57-200
Orgánicos <b>pesado</b> a orgánicos ligeros	10-60	57-340
Petróleo <b>crudo</b> a gasóleo	30-55	170-310

Se ha tomado un valor arbitrario inicial de  $U_o = 350 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ , y aplicando el método, se realizan múltiples iteraciones hasta llegar al valor de  $U_o = 418 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ , con este último valor iterado se realiza paso por paso dicho método.

Se calcula el área de intercambio de calor:

$$A = \frac{Q}{\Delta T_{ml} * U_o}$$

Para ello es necesario hallar el  $\Delta T_{ml}$ :

$$\Delta T_{ml} = \frac{(T_{E,c} - T_{S,f}) - (T_{S,c} - T_{E,f})}{\ln \left( \frac{(T_{E,c} - T_{S,f})}{(T_{S,c} - T_{E,f})} \right)}$$

$$\Delta T_{ml} = \frac{(170 - 102) - (237 - 98)}{\ln \left( \frac{(170 - 102)}{(237 - 98)} \right)}$$

$$\Delta T_{ml} = 99,3^\circ\text{C}$$

Por lo tanto, el área de intercambio será:

$$A = \frac{9,3 * 10^6}{99,3 * 418} = 223,9 \text{ m}^2$$

Se calcula el área externa de un tubo (área de contacto para el intercambio) y a partir de este dato y del dato de área de intercambio se calcula el número de tubos necesarios:

$$A_t = \pi * L * D_E$$

$$A_t = \pi * 6 * 2,54 * 10^{-2} = 0,479 \text{ m}^2$$

Por lo tanto, el número de tubos necesarios será:

$$N_t = \frac{A}{A_t}$$

$$N_t = \frac{223,9}{0,479} = 467,6 \text{ tubos} \rightarrow 468 \text{ tubos}$$

Una vez conocido el número de tubos necesarios se calcula el diámetro del haz de tubos que se encuentra en disposición en disposición triangular, lo cual se justifica más adelante:

$$D_{haz} = D_E * \left( \frac{N_t}{K_1} \right)^{1/n_1}$$

Los valores de  $K_1$  y  $n_1$  son valores que se encuentran tabulados dependiendo del número de pasos por tubo y del arreglo de estos.

Se ha seleccionado 1 paso por tubo y arreglo triangular como dice Luyben, W.L. (2010) en su patente. Esto se justifica ya que el arreglo triangular proporciona valores de coeficiente de transferencia de calor mayores y por tanto favorece dicha transferencia.

Para esta selección los valores de  $K_1$  y  $n_1$  son 0,319 y 2,142.

$$D_{haz} = 2,54 * 10^{-2} * \left( \frac{468}{0,319} \right)^{1/2,142}$$

$$D_{haz} = 0,659$$

Se selecciona un tipo de cabezal para la carcasa. Para estos tipos de procesos se suele utilizar el cabezal ya que proporciona mejor intercambio de calor dentro del reactor.

Para calcular el diámetro del cabezal, este tipo de cabezal sigue un patrón lineal dependiente del diámetro del haz de tubos:

$$D_{cabezal} = +1,01 * D_{haz} + 0,008$$

$$D_{cabezal} = 0,673 \text{ m}$$

Se selecciona un distanciamiento entre los deflectores entre un rango óptimo de 0,3 m y 0,4 m, siempre que el diámetro del intercambiador se encuentre entre 0,5 m y 1 m, y se calcula el valor de Pitch que se recomienda que sea de 1,25 veces el diámetro exterior de los tubos.

El valor elegido para la distancia entre deflectores es:

$$I_b = 0,3 \text{ m}$$

El valor del Pitch es el siguiente:

$$Pitch = 1,25 * D_E$$

$$Pitch = 1,25 * 2,54 * 10^{-2}$$

$$Pitch = 3,18 \text{ cm}$$

Una vez calculados estos parámetros se procede al cálculo del área perpendicular al flujo siguiendo la siguiente expresión:

$$A_s = \frac{D_{cabezal} * I_b * (Pitch - D_E)}{D_E}$$

$$A_s = \frac{0,673 * 0,3 * (3,18 * 10^{-2} - 2,54 * 10^{-2})}{2,54 * 10^{-2}}$$

$$A_s = 0,0509 \text{ m}^2$$

## 2.4. DISEÑO TERMODINÁMICO DEL REACTOR.

Una vez calculados todos los parámetros mecánicos, es necesario verificar que el valor de  $U$  supuesto converge, para ello se calculan las diferentes resistencias que se oponen a la transmisión de calor entre los dos fluidos y a partir de eso calcular y verificar el coeficiente global de transmisión de calor ( $U$ ). para ello partimos de la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{U} = \sum \text{Resistencias}$$

Las resistencias que existen en este intercambio son 3:

- 1- Resistencia a la convección del fluido caliente
- 2- Resistencia a la conducción por el material del tubo
- 3- Resistencia a la convección del fluido frío

Por lo tanto, la ecuación anterior queda de la siguiente forma:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_c} + \frac{e}{k_o} + \frac{1}{h_f}$$

Siendo:

$h_c \rightarrow$  coeficiente de convección del fluido caliente.

$h_f \rightarrow$  coeficiente de convección del fluido frío

$k_o \rightarrow$  conductividad térmica del material AISI 316L =  $16 \text{ W/m} \cdot \text{K}$

$e \rightarrow$  espesor del tubo.

### 1- RESISTENCIA A LA CONVECCIÓN DEL FLUIDO CALIENTE (TUBOS)

Para calcular dicha resistencia será necesario el cálculo del coeficiente de convección del fluido caliente.

Para ello será necesario obtener el Nusselt (Nu), a partir de los números adimensionales de Reynolds y de Prandtl y además de las correlaciones correspondientes.

$$Re = \frac{V * \rho * D_I}{\mu}$$

Siendo:

$V \rightarrow$  la velocidad del fluido por el interior de los tubos ( $m/s$ ).

$\rho \rightarrow$  la densidad del fluido ( $kg/m^3$ ).

$\mu \rightarrow$  la viscosidad dinámica ( $Pa * s$ ).

Sabiendo que el caudal volumétrico del fluido depende de la sección de paso y de la velocidad del fluido se llega a que:

$$Q = V * S$$

$$S = \pi * \frac{D_I^2}{4}$$

$$S = \pi * \frac{(2,19 * 10^{-2})^2}{4} = 3,77 * 10^{-4} m^2$$

El caudal volumétrico se calcula a partir del caudal másico y de la densidad del fluido:

$$\rho = \frac{\dot{m}}{Q}$$

$$Q = \frac{\dot{m}_c}{\rho} = \frac{58,578}{657} = 0,089 m^3/s$$

Por tanto:

$$Q = V * S$$

$$V = \frac{Q}{S} = \frac{0,089}{3,77 * 10^{-4}} = 236,67 m/s$$

El resto de parámetros para calcular el Reynolds ya son conocidos a partir del software Aspen Plus™ y por el propio diseño del reactor:

$$Re = \frac{236,67 * 657 * 2,19 * 10^{-2}}{1,21 * 10^{-4}}$$

$$Re = 2,8 * 10^7$$

Para calcular el número de Prandtl se sigue la siguiente expresión:

$$Pr = \frac{C_p * \mu}{k}$$

Siendo:

$C_p \rightarrow$  la capacidad calorífica del fluido  $(J/kg * K)$ .

$k \rightarrow$  la conductividad térmica del fluido  $(W/m * K)$ .

$$Pr = \frac{2367 * 1,21 * 10^{-4}}{0,088}$$

$$Pr = 3,25$$

Con estos datos de número de Reynolds y número de Prandtl se calcula el número adimensional de Nusselt a partir de la siguiente correlación:

$$Nu = 0,023 * Re^{0,8} * Pr^{0,3}$$

$$Nu = 0,023 * (2,8 * 10^7)^{0,8} * 3,25^{0,3}$$

$$Nu = 29804$$

El coeficiente de convección se calcula a partir de la definición de Nusselt:

$$Nu = \frac{h_c * D_I}{k}$$

$$h_c = \frac{Nu * k}{D_I}$$

$$h_c = \frac{29804 * 0,088}{2,19 * 10^{-2}} = 119281,6 W/m^2 * K$$

## 2- RESISTENCIA A LA CONVECCIÓN DEL FLUIDO FRÍO (CARCASA)

Todos los datos físicos del fluido son obtenidos del software Aspen Plus™. El fluido se trata de vapor de agua a 100°C.

Se calcula la velocidad del fluido por el lado de la carcasa:

$$G_s = \frac{\dot{m}_f}{A_s} = \frac{4,116}{0,04}$$

$$G_s = 102,9 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$$

Se calcula el diámetro hidráulico de la carcasa para una distribución de tubos triangular:

$$D_{eq} = \frac{1,10}{D_E} (Pitch^2 - 0,917 * D_E^2)$$

$$D_{eq} = \frac{1,10}{(2,54 * 10^{-2})} ((3,18 * 10^{-2})^2 - 0,917 * (2,54 * 10^{-2})^2)$$

$$D_{eq} = 1,8 * 10^{-2} \text{ m}$$

Se calcula el número de Reynolds y el número de Prandtl:

$$Re = \frac{G_s * D_{eq}}{\mu}$$

$$Re = \frac{102,9 * 1,8 * 10^{-2}}{1,227 * 10^{-5}}$$

$$Re = 1,5 * 10^5$$

$$Pr = \frac{C_p * \mu}{k}$$

$$Pr = \frac{2029 * 1,227 * 10^{-5}}{0,025}$$

$$Pr = 1$$

El Nusselt se calcula mediante la siguiente correlación

$$Nu = 0,023 * (1,5 * 10^5)^{0,8} * 1^{0,3}$$

$$Nu = 316,9$$

Se calcula el coeficiente de convección para el fluido refrigerante mediante la definición de Nusselt:

$$Nu = \frac{h_f * D_{eq}}{k}$$

$$h_f = \frac{Nu * k}{D_{eq}}$$

$$h_f = \frac{316,9 * 0,025}{1,8 * 10^{-2}}$$

$$h_f = 441 \text{ W/m}^2 * K$$

### 3- RESISTENCIA A LA CONDUCCIÓN POR EL MATERIAL DEL TUBO

La última de las resistencias que hay que calcular es la resistencia que ofrece el material del tubo (AISI 316L) a la conducción del calor. Esta resistencia depende tanto del espesor del tubo como del propio coeficiente de conducción del material. Se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\frac{e}{k_o} = \frac{2,54 * 10^{-2} - 2,19 * 10^{-2}}{16} = 2,18 * 10^{-4} \text{ m}^2 * K/W$$

Una vez calculadas todas las resistencias que tienen lugar se calcula el coeficiente global de transferencia de calor (U):

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_c} + \frac{e}{k_o} + \frac{1}{h_f}$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_c} + \frac{e}{k_o} + \frac{1}{h_f}}$$



$$U = \frac{1}{\frac{1}{119281,6} + 2,18 * 10^{-4} + \frac{1}{441}}$$

$$U = 401 \text{ W/m}^2 * K$$

El valor supuesto fue de  $418 \frac{W}{m^2 * K}$ , el error que se produce es del 4% y se puede tolerar asumiendo así que el diseño mecánico y termodinámico del reactor es correcto y no es necesario realizar otra iteración.

## ANEXO 3. DISEÑO MECÁNICO Y TERMODINÁMICO DEL REACTOR DE TRANSALQUILACIÓN

El diseño mecánico y termodinámico del reactor de transalquilación se aborda siguiendo el mismo procedimiento realizado en el reactor anterior.

### 3.1. SELECCIÓN DE LAS DIMENSIONES DE LOS TUBOS

Como indica Luyben, W.L. (2010), en la patente citada, el diámetro de los tubos y la longitud de estos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla A.3.1: Dimensiones de los tubos R. Transalquilación	
Diámetro externo (cm)	1,02
Diámetro interno (cm)	0,86
Espesor (cm)	0,08
Longitud (m)	1,75

Dichos valores además de estar regidos por la patente previamente citada, se encuentran bajo la normativa TEMA específica para reacciones de este carácter. Se ha preferido comenzar el cálculo utilizando una suposición de dimensiones de los tubos basada en un sistema específicamente desarrollado para el proceso diseñado en este trabajo.

### 3.2. CAUDAL DE REFRIGERANTE NECESARIO

Siguiendo el método citado, a continuación, se realiza un balance de energía entre el fluido caliente y el refrigerante:

$$Q_{cedido} = Q_{absorbido}$$

Los datos necesarios de las diferentes corrientes se muestran en las siguientes tablas:

Tabla A.3.2: Datos de la corriente caliente	
Caudal másico (kg/s)	0,137
Capacidad calorífica (J/Kg*K)	2317,75
Temperatura de entrada (°C)	170
Temperatura de salida (°C)	220
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	672,4
Viscosidad (Pa*s)	1,24E-04
Conductividad térmica (W/m*K)	0,09

Tabla A.3.3: Datos de la corriente fría	
Calor latente (J/kg)	2257000
Capacidad calorífica (J/Kg*K)	2029
Temperatura de entrada (°C)	98
Temperatura de salida (°C)	102
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	0,598
Viscosidad (Pa*s)	1,23E-05
Conductividad térmica (W/m*K)	0,025

Estos datos son obtenidos del software Aspen Plus™ en las condiciones de trabajo.

La temperatura de entrada y salida del refrigerante son aquellas que pueda considerarse que el refrigerante trabaja en prácticamente isotérmico, ya que al variar la temperatura de refrigeración se tendría que tener en cuenta el perfil de dicha temperatura y complicaría demasiado el diseño del reactor. Además, al utilizar calores sensibles el salto térmico es demasiado pequeño y produce que el diseño no sea viable mecánicamente.

En un análisis previo se intenta que el fluido refrigerante trabaje de forma isotérmica, pero sin que exista cambio de fase en dicho fluido, esto, como también se ha citado anteriormente, crea problemas en el diseño mecánico de la columna además de ser necesario un caudal de refrigerante muy elevado. Dichos problemas mecánicos son en

definitiva los mismos que en el reactor anterior, valores de L/D muy inusuales ya que este parámetro toma valores muy elevados y el reactor tendría pocos tubos y de una longitud inmensa lo que no es viable dentro de la industria.

Por ello, después de estos estudios se llega a la conclusión que es necesario utilizar un sistema de intercambio de calor que opere en un rango de temperaturas que produzca la vaporización del agua, implicando el calor latente de vaporización en la operación, esto soluciona ambos problemas ya que los calores latentes son mucho mayores que los calores sensibles y esto soluciona el problema del salto térmico acercando el comportamiento del refrigerante más a la isothermicidad. Además, esto hace que el perfil de temperatura del fluido refrigerante se pueda desprestigiar y tomar una temperatura media entre la entrada y la salida y considerar que el fluido refrigerante se comporta de forma isotérmica.

El fluido seleccionado es agua que entra en las mismas condiciones de presión y temperatura que en el reactor de alquilación.

$$Q_{cedido} = Q_{absorbido}$$

$$\dot{m}_c * C_{p,c} * \Delta T = \dot{m}_f * L_v$$

$$0,137 * 2317,75 * (220 - 170) = \dot{m}_c * L_v$$

$$15876,6 \text{ W} = \dot{m}_f * L_v$$

$$\dot{m}_f = \frac{15876,6}{2257000} = 0,007 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

### 3.3. DISEÑO MECÁNICO DEL REACTOR Y CÁLCULO DE U.

Una vez determinado los caudales de cada corriente se procede con el diseño mecánico del reactor.

Para comenzar se selecciona un valor de coeficiente de transferencia de calor ( $U_o$ ), con dicho valor se calculará el área necesaria de intercambio de calor y a partir de ello todos los parámetros mecánicos que conllevan al diseño del reactor.

El valor inicial de  $U_o$ , tal y como aconseja el método Kern, se toma a partir de la siguiente gráfica obtenida del libro *Principios de la Transferencia de Calor* (Frank Kreith), para así conseguir afinar el valor desde el inicio de la forma más exacta posible:

**TABLA 8.5** Coeficientes globales de transferencia de calor aproximados para estimaciones preliminares

Trabajo	Coeficiente global, $U$	
	(Btu/h ft <sup>2</sup> °F)	(W/m <sup>2</sup> K)
Vapor a agua		
calentador instantáneo	400–600	2 270–3 400
calentador de tanque de almacenamiento	175–300	990–1 700
Vapor a aceite		
combustible <b>pesado</b>	10–30	57–170
combustible ligero	30–60	170–340
destilado de petróleo ligero	50–200	280–1 130
Vapor a soluciones acuosas	100–600	570–3 400
Vapor a gases	5–50	28–280
Agua a aire comprimido	10–30	57–170
Agua a agua, enfriadores con camisa de agua	150–275	850–1 560
Agua a aceite lubricante	20–60	110–340
Agua a vapores de aceite en condensación	40–100	220–570
Agua a alcohol en condensación	45–120	255–680
Agua a Freón-12 en condensación	80–150	450–850
Agua a amoníaco en condensación	150–250	850–1 400
Agua a solventes orgánicos, alcohol	50–150	280–850
Agua a Freón-12 en ebullición	50–150	280–850
Agua a gasolina	60–90	340–510
Agua a gasóleo o destilado	35–60	200–340
Agua a salmuera	100–200	570–1 130
Orgánicos ligeros a orgánicos ligeros	40–75	220–425
Orgánicos medios a orgánicos medios	20–60	110–340
Orgánicos pesados a orgánicos pesados	10–40	57–200
Orgánicos <b>pesado</b> a orgánicos ligeros	10–60	57–340
Petróleo <b>crudo</b> a gasóleo	30–55	170–310

Se ha tomado un valor arbitrario inicial de  $U_o = 60 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ , y aplicando el método, se realizan múltiples iteraciones hasta llegar al valor de  $U_o = 15 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ , con este último valor iterado se realiza paso por paso dicho método.

Se calcula el área de intercambio de calor:

$$A = \frac{Q}{\Delta T_{ml} * U_o}$$

Para ello es necesario hallar el  $\Delta T_{ml}$ :

$$\Delta T_{ml} = \frac{(T_{E,c} - T_{S,f}) - (T_{S,c} - T_{E,f})}{\ln \left( \frac{(T_{E,c} - T_{S,f})}{(T_{S,c} - T_{E,f})} \right)}$$

$$\Delta T_{ml} = \frac{(170 - 102) - (220 - 98)}{\ln \left( \frac{(170 - 102)}{(220 - 98)} \right)}$$

$$\Delta T_{ml} = 92,4^{\circ}\text{C}$$

Por lo tanto, el área de intercambio será:

$$A = \frac{15876,6}{92,4 * 15} = 11,41 \text{ m}^2$$

Se calcula el área de un tubo y a partir de este dato y del dato de área de intercambio se calcula el número de tubos necesarios:

$$A_t = \pi * L * D_E$$

$$A_t = \pi * 1,75 * 1,02 * 10^{-2} = 0,056 \text{ m}^2$$

Por lo tanto, el número de tubos necesarios será:

$$N_t = \frac{A}{A_t}$$

$$N_t = \frac{11,41}{0,056} = 203,75 \text{ tubos} \rightarrow 204 \text{ tubos}$$

Una vez conocido el número de tubos necesarios se calcula el diámetro del haz de tubos que se encuentra en disposición en disposición triangular, lo cual se justifica de la misma forma que en el reactor de alquilación:

$$D_{haz} = D_E * \left( \frac{N_t}{K_1} \right)^{1/n_1}$$

Los valores de  $K_1$  y  $n_1$  son valores que se encuentran tabulados dependiendo del número de pasos por tubo y del arreglo de estos.

Se ha seleccionado 1 paso por tubo y arreglo triangular como dice Luyben, W.L. (2010) en su patente.

Para esta selección los valores de  $K_1$  y  $n_1$  son 0,319 y 2,142.

$$D_{haz} = 1,02 * 10^{-2} * \left( \frac{204}{0,319} \right)^{1/2,142}$$

$$D_{haz} = 0,208 \text{ m}$$

Se selecciona un tipo de cabezal para la carcasa. Para estos tipos de procesos se suele utilizar el cabezal fijo ya que proporciona mejor intercambio de calor dentro del reactor.

Para calcular el diámetro del cabezal, este tipo de cabezal sigue un patrón lineal dependiente del diámetro del haz de tubos:

$$D_{cabezal} = 1,01 * D_{haz} + 0,008$$

$$D_{cabezal} = 0,218 \text{ m}$$

Se selecciona un distanciamiento entre los deflectores entre un rango óptimo de 0.3 m y 0,4 m, siempre que el diámetro del intercambiador se encuentre entre 0,5 m y 1 m, y se calcula el valor de Pitch que se recomienda que sea de 1,25 veces el diámetro exterior de los tubos.

El valor elegido para la distancia entre deflectores es:

$$I_b = 0,3 \text{ m}$$

El valor del Pitch es el siguiente:

$$Pitch = 1,25 * D_E$$

$$Pitch = 1,25 * 1,02 * 10^{-2}$$

$$Pitch = 1,28 \text{ cm}$$

Una vez calculados estos parámetros se procede al cálculo del área perpendicular al flujo siguiendo la siguiente expresión:

$$A_s = \frac{D_{cabezal} * I_b * (Pitch - D_E)}{D_E}$$

$$A_s = \frac{0,185 * 0,3 * (1,28 * 10^{-2} - 1,02 * 10^{-2})}{1,02 * 10^{-2}}$$

$$A_s = 0,0141 \text{ m}^2$$

### 3.4. DISEÑO TERMODINÁMICO DEL REACTOR.

Una vez calculados todos los parámetros mecánicos, es necesario verificar que el valor de U supuesto converge, para ello se calculan las diferentes resistencias que se oponen a la transmisión de calor entre los dos fluidos y a partir de eso calcular y verificar el coeficiente global de transmisión de calor (U). para ello partimos de la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{U} = \sum \text{Resistencias}$$

Las resistencias que existen en este intercambio son 3:

- 4- Resistencia a la convección del fluido caliente.
- 5- Resistencia a la conducción por el material del tubo.
- 6- Resistencia a la convección del fluido frío.

Por lo tanto, la ecuación anterior queda de la siguiente forma:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_c} + \frac{e}{k_o} + \frac{1}{h_f}$$

Siendo:

$h_c$  → coeficiente de convección del fluido caliente.

$h_f$  → coeficiente de convección del fluido frío.

$k_o$  → conductividad térmica del material AISI 316L =  $16 \text{ W/m} \cdot \text{K}$

#### 1- RESISTENCIA A LA CONVECCIÓN DEL FLUIDO CALIENTE (TUBOS)

Para calcular dicha resistencia será necesario el cálculo del coeficiente de convección del fluido caliente.

Para ello será necesario obtener el Nusselt (Nu), a partir de los números adimensionales de Reynolds y de Prandtl y además de las correlaciones correspondientes.

$$Re = \frac{V * \rho * D_I}{\mu}$$



Siendo:

$V \rightarrow$  la velocidad del fluido por el interior de los tubos ( $m/s$ ).

$\rho \rightarrow$  la densidad del fluido ( $kg/m^3$ ).

$\mu \rightarrow$  la viscosidad dinámica ( $Pa \cdot s$ ).

Sabiendo que el caudal volumétrico del fluido depende de la sección de paso y de la velocidad del fluido se llega a que:

$$Q = V * S$$

$$S = \pi * \frac{D_I^2}{4}$$

$$S = \pi * \frac{(8,6 * 10^{-3})^2}{4} = 5,8 * 10^{-5} m^2$$

El caudal volumétrico se calcula a partir del caudal másico y de la densidad del fluido:

$$\rho = \frac{\dot{m}}{Q}$$

$$Q = \frac{\dot{m}_c}{\rho} = \frac{0,137}{672,4} = 2,04 * 10^{-4} m^3/s$$

Por tanto:

$$Q = V * S$$

$$V = \frac{Q}{S} = \frac{2,04 * 10^{-4}}{5,8 * 10^{-5}} = 3,51 m/s$$

El resto de parámetros para calcular el Reynolds ya son conocidos a partir del software Aspen Plus™ y por el propio diseño del reactor:

$$Re = \frac{3,51 * 672,4 * 8,6 * 10^{-3}}{1,24 * 10^{-4}}$$

$$Re = 1,6 * 10^5$$

Para calcular el número de Prandtl se sigue la siguiente expresión:

$$Pr = \frac{C_p * \mu}{k}$$

Siendo:

$C_p \rightarrow$  la capacidad calorífica del fluido ( $J/kg * K$ ).

$k \rightarrow$  la conductividad térmica del fluido ( $W/m * K$ ).

$$Pr = \frac{2317,75 * 1,24 * 10^{-4}}{0,09}$$

$$Pr = 3,19$$

Con estos datos de número de Reynolds y número de Prandtl se calcula el número adimensional de Nusselt a partir de la siguiente correlación:

$$Nu = 0,023 * Re^{0,8} * Pr^{0,3}$$

$$Nu = 0,023 * (1,6 * 10^5)^{0,8} * 3,19^{0,3}$$

$$Nu = 482$$

El coeficiente de convección se calcula a partir de la definición de Nusselt:

$$Nu = \frac{h_c * D_I}{k}$$

$$h_c = \frac{Nu * k}{D_I}$$

$$h_c = \frac{482 * 0,09}{8,06 * 10^{-3}} = 5071,96 W/m^2 * K$$

## 2- RESISTENCIA A LA CONVECCIÓN DEL FLUIDO FRÍO (CARCASA)

Todos los datos físicos del fluido son obtenidos del software Aspen Plus™. El fluido se trata de vapor de agua a 100°C.

Se calcula la velocidad del fluido por el lado de la carcasa:

$$G_s = \frac{\dot{m}_f}{A_s} = \frac{0,007}{0,011}$$

$$G_s = 1,27 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$$

Se calcula el diámetro hidráulico de la carcasa para una distribución de tubos triangular:

$$D_{eq} = \frac{1,10}{D_E} (Pitch^2 - 0,917 * D_E^2)$$

$$D_{eq} = \frac{1,10}{(1,02 * 10^{-2})} ((1,28 * 10^{-2})^2 - 0,917 * (1,02 * 10^{-2})^2)$$

$$D_{eq} = 7,24 * 10^{-3} \text{ m}$$

Se calcula el número de Reynolds y el número de Prandtl:

$$Re = \frac{G_s * D_{eq}}{\mu}$$

$$Re = \frac{1,27 * 7,24 * 10^{-3}}{1,227 * 10^{-5}}$$

$$Re = 749,37$$

$$Pr = \frac{C_p * \mu}{k}$$

$$Pr = \frac{2029 * 1,227 * 10^{-5}}{0,025}$$

$$Pr = 1$$

Para fluidos en este tipo de régimen el Nusselt tiene un valor constante según las correlaciones pertinentes:

$$Nu = 4,36$$

Se calcula el coeficiente de convección para el fluido refrigerante mediante la definición de Nusselt:

$$Nu = \frac{h_f * D_{eq}}{k}$$

$$h_f = \frac{Nu * k}{D_{eq}}$$

$$h_f = \frac{4,36 * 0,025}{7,24 * 10^{-3}}$$

$$h_f = 15,1 \text{ W/m}^2 * K$$

### 3- RESISTENCIA A LA CONDUCCIÓN POR EL MATERIAL DEL TUBO

La última de las resistencias que hay que calcular es la resistencia que ofrece el material del tubo (AISI 316L) a la conducción del calor. Esta resistencia depende tanto del espesor del tubo como del propio coeficiente de conducción del material. Se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\frac{e}{k_o} = \frac{2,54 * 10^{-2} - 1,02 * 10^{-2}}{16} = 9,5 * 10^{-4} \text{ m}^2 * K/W$$

Una vez calculadas todas las resistencias que tienen lugar se calcula el coeficiente global de transferencia de calor (U):

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_c} + \frac{e}{k_o} + \frac{1}{h_f}$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_c} + \frac{e}{k_o} + \frac{1}{h_f}}$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{5071,96} + 9,5 * 10^{-4} + \frac{1}{15,1}}$$

$$U = 14,84 \text{ W/m}^2 * K$$

El valor supuesto fue de  $15 \frac{W}{m^2 * K}$ , el error que se produce es del 1% y se puede tolerar  
asumiendo así que el diseño mecánico y termodinámico del reactor es correcto y no es  
necesario realizar otra iteración.

## ANEXO 4. CÁLCULO DE LA MASA DE CATALIZADOR NECESARIA EN EL REACTOR DE ALQUILACIÓN

Una vez realizado el diseño mecánico del reactor y calculado su coeficiente global de transferencia de calor (U), es necesario calcular la masa de catalizador por tubo que es necesaria para conseguir los objetivos marcados.

Para este cálculo se plantea la resolución simultánea de la ecuación de diseño del reactor y el balance de energía del reactor ya que como el reactor no se encuentra en carácter isotérmico, es necesario realizar estos cálculos para intervalos pequeños de conversión dentro del reactor donde el incremento de la temperatura sea mínimo. Es por ello, que las ecuaciones a resolver son ecuaciones diferenciales ordinarias las cuales a causa de su complejidad no es posible su resolución a través de la integración directa y será necesario recurrir a métodos numéricos. Las ecuaciones que será necesario resolver son las siguientes:

$$\frac{dW_t}{dX_A} = \frac{(w_{A,0})_t}{[-r'_A(T, X_A)]}$$

**Ecuación A.4.1: Ecuación de diseño R. Alquilación**

**Froment, G.F., Bischoff, K.B. (1990)**

$$\frac{dT}{dX_A} = \left[ \frac{\Delta H}{v_A} + \frac{4U(T_R - T)}{\rho_L d_t (-r'_A)} \right] \frac{(w_{A,0})_t}{w_t C_{p,f}}$$

**Ecuación A.4.2: Balance de Energía R. Alquilación**

**Froment, G.F., Bischoff, K.B. (1990)**

El método numérico que se lleva a cabo es el método numérico de Euler, el cual se utiliza para resolver ecuaciones diferenciales ordinarias a partir de un valor inicial dado. Este método calcula de forma aproximada el valor de la solución y en el punto de abscisa  $x_1$  y con este punto aproximado ya calculado se puede repetir el método para obtener otro punto aproximado  $(x_2, y_2)$  y así sucesivamente.

Es habitual en este método tomar abscisas a la misma distancia, tomando h como el paso del método entre un punto de abscisas y otro.

Desde el punto de vista geométrico, se tiene, en definitiva, que el método de Euler se aproxima a la función solución por medio de una línea poligonal, la aproximación será mejor cuanto más pequeño sea el paso que se tome del método,  $h$ . (C. Chapra y C. Canale, 2015)

Ambas reacciones que se producen en este reactor, alquilación y polialquilación, son reacciones de segundo orden global y de primer orden con respecto a sus reactivos. Por lo tanto, las velocidades de reacción siguen la siguiente forma:

$$-r'_A = k_1 * C_P * C_B$$

**Ecuación A.4.3: Velocidad de la reacción de Alquilación**

$$-r'_A = k_2 * C_P * C_C$$

**Ecuación A.4.4: Velocidad de la reacción de Polialquilación**

Siendo:

$k_1 \rightarrow$  la constante de velocidad de la reacción de alquilación  $kg/mol * s$

$k_2 \rightarrow$  la constante de velocidad de la reacción de polialquilación  $kg/mol * s$

$C_P \rightarrow$  la concentración de propileno  $mol/m^3$

$C_B \rightarrow$  la concentración de benceno  $mol/m^3$

$C_C \rightarrow$  la concentración de cumeno  $mol/m^3$

Dichas reacciones dependen de la temperatura y de la cantidad de reactivos que haya en cada momento, es decir, la velocidad de reacción no es constante en todo el proceso, para ello será necesario calcular dichas constantes de velocidad para cada temperatura en cada intervalo de conversión, se presentan las constantes cinéticas de ambas reacciones obtenidas de la patente de Luyben, W.L. (2010):

<b>Tabla A.4.1: Constantes cinéticas R. Alquilación</b>		
	<b>Reacción 1</b>	<b>Reacción 2</b>
$K_o$ (kg/(mol*s))	750	400
$E_a$ (kJ/kmol)	84300	88142

Dichas constantes de velocidad se calculan mediante la ecuación de Arrhenius:

$$k = k_o * e^{\frac{-E_a}{R*T}}$$

**Ecuación A.4.5: Ecuación de Arrhenius**

Los valores que permanecen constantes en todo el cálculo de la masa de catalizador se muestran en la siguiente tabla:

<b>Tabla A.4.2: Constantes R. Alquilación</b>	
$U$ (W/m <sup>2</sup> *K)	418
Temperatura refrigerante(C)	100
Temperatura inicial (C)	170
densidad zeolita(kg/m <sup>3</sup> )	1200
Concentración inicial propileno (mol/m <sup>3</sup> )	32771,88
Concentración inicial benceno (mol/m <sup>3</sup> )	163859,40
Caudal másico por tubo (kg/s)	0,13
Caudal molar por tubo (mol/s)	1,74
$k_o$ (kg/mol*s)	750
$E_a$ (J/mol)	84300
Diámetro del tubo(m)	0,02
Entalpía de reacción(J/mol)	-15650
Paso, h	0,001

La densidad del catalizador ha sido obtenida de su ficha técnica proporcionada por ZeolithMed™.

A partir de estos datos y de las ecuaciones de velocidad, de diseño y el balance de energía para este reactor se realiza a través del software Microsoft Excel 2019™ el pertinente método numérico.

Los datos termodinámicos como la entalpía de reacción y las capacidades caloríficas a diferentes temperaturas han sido obtenidos del software Aspen Plus™ V.9.



**DISEÑO DE UN PROCESO DE PRODUCCIÓN DE CUMENO MEDIANTE UN REACTOR DE  
ALQUILACIÓN Y UN REACTOR DE TRANSALQUILACIÓN CATALÍTICOS.**

**Tabla A.4.3: CALCULO DE MASA DE CATALIZADOR NECESARIA PARA EL REACTOR DE ALQUILACIÓN**

	$X_A$	T(°C)	Cp (J/kg·K)	k (kg/mol <sup>2</sup> s)	[Propileno] (mol/m <sup>3</sup> )	[Benceno] (mol/m <sup>3</sup> )	[Cumeno] (mol/m <sup>3</sup> )	[DIPB] (mol/m <sup>3</sup> )	[Propano] (mol/m <sup>3</sup> )	frac Propileno	frac Benceno	frac Cumeno	frac DIPB	frac Propano	Cp Propileno (J/kg·K)	Cp Benceno (J/kg·K)	Cp Cumeno (J/kg·K)	Cp DIPB (J/kg·K)	Cp Propano (J/kg·K)	-ra' (mol/kg·s)	Masa de catalizador (kg)
1	0	170	2938,485	8,61E-08	32771,88	163859,4	0	0	63,024	0,166613	0,833066	0	0	0,00032	412,9175	2524,697	0	0	0,870805	0	0
2	0,001	170,074	2939,197	8,64E-08	32739,11	163826,6	32,72928	0,042603	63,024	0,166474	0,833039	0,0002	2,17E-07	0,00032	412,6261	2525,243	0,456349	0,00051	0,871073	462,1308	3,77E-06
3	0,002	170,148	2939,908	8,67E-08	32706,34	163793,9	65,45855	0,085207	63,024	0,166335	0,833011	0,000399	4,33E-07	0,000321	412,3346	2525,788	0,91282	0,001021	0,871341	463,3456	7,53E-06
4	0,003	170,222	2940,619	8,71E-08	32673,56	163761,1	98,18783	0,12781	63,024	0,166196	0,832983	0,000599	6,5E-07	0,000321	412,0428	2526,334	1,369414	0,001532	0,87161	464,5621	1,13E-05
5	0,004	170,296	2941,33	8,74E-08	32640,79	163728,3	130,9171	0,170414	63,024	0,166057	0,832955	0,000799	8,67E-07	0,000321	411,7508	2526,879	1,826131	0,002043	0,871878	465,7803	1,5E-05
6	0,005	170,37	2942,04	8,77E-08	32608,02	163695,5	163,6464	0,213017	63,024	0,165918	0,832927	0,000998	1,08E-06	0,000321	411,4586	2527,424	2,282971	0,002555	0,872146	467,0002	1,87E-05
7	0,006	170,444	2942,751	8,81E-08	32575,25	163662,8	196,3757	0,255621	63,024	0,165779	0,832899	0,001198	1,3E-06	0,000321	411,1661	2527,969	2,739933	0,003067	0,872415	468,2217	2,25E-05
8	0,007	170,518	2943,46	8,84E-08	32542,48	163630	229,1049	0,298224	63,024	0,16564	0,832871	0,001398	1,52E-06	0,000321	410,8735	2528,514	3,197018	0,003579	0,872683	469,4449	2,62E-05
9	0,008	170,592	2944,17	8,87E-08	32509,71	163597,2	261,8342	0,340828	63,024	0,165501	0,832844	0,001597	1,74E-06	0,000321	410,5806	2529,058	3,654226	0,004091	0,872952	470,6698	2,99E-05
10	0,009	170,666	2944,879	8,91E-08	32476,93	163564,5	294,5635	0,383431	63,024	0,165362	0,832816	0,001797	1,95E-06	0,000321	410,2876	2529,602	4,111557	0,004604	0,87322	471,8964	3,36E-05
11	0,01	170,74	2945,588	8,94E-08	32444,16	163531,7	327,2928	0,426034	63,024	0,165222	0,832788	0,001997	2,17E-06	0,000321	409,9943	2530,146	4,56901	0,005117	0,873489	473,1246	3,72E-05
12	0,011	170,814	2946,297	8,97E-08	32411,39	163498,9	360,022	0,468638	63,024	0,165083	0,83276	0,002196	2,39E-06	0,000321	409,7008	2530,69	5,026586	0,00563	0,873758	474,3544	4,09E-05
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
990	0,989	236,043	3603,483	1,68E-06	360,4907	131448	32369,25	42,13481	63,024	0,002194	0,800132	0,197467	0,000257	0,000384	6,059144	3085,678	509,9016	0,669952	1,17402	86,49044	0,002416
991	0,99	236,103	3604,178	1,68E-06	327,7188	131415,2	32401,98	42,17741	63,024	0,001995	0,800092	0,197667	0,000257	0,000384	5,509925	3086,348	510,4746	0,670823	1,174374	79,44965	0,002438
992	0,991	236,163	3604,869	1,68E-06	294,9469	131382,5	32434,71	42,22001	64,024	0,001796	0,800047	0,197865	0,000257	0,00039	4,960353	3086,999	511,0445	0,671695	1,19336	72,37868	0,002462
993	0,992	236,223	3605,559	1,69E-06	262,175	131349,7	32467,44	42,26262	65,024	0,001597	0,800003	0,198063	0,000258	0,000396	4,410466	3087,649	511,6145	0,672566	1,212357	65,27748	0,002488
994	0,993	236,283	3606,248	1,69E-06	229,4032	131316,9	32500,17	42,30522	66,024	0,001397	0,799958	0,198262	0,000258	0,000402	3,860263	3088,299	512,1846	0,673439	1,231365	58,14599	0,002518
995	0,994	236,343	3606,937	1,7E-06	196,6313	131284,2	32532,9	42,34782	67,024	0,001198	0,799913	0,19846	0,000258	0,000408	3,309744	3088,948	512,7547	0,674311	1,250384	50,98415	0,002553
996	0,995	236,402	3607,624	1,7E-06	163,8594	131251,4	32565,63	42,39043	68,024	0,000999	0,799868	0,198659	0,000258	0,000415	2,758909	3089,595	513,3248	0,675184	1,269413	43,79192	0,002592
997	0,996	236,462	3608,308	1,7E-06	131,0875	131218,6	32598,36	42,43303	69,024	0,000799	0,799823	0,198857	0,000259	0,000421	2,207758	3090,241	513,8948	0,676058	1,288454	36,56924	0,00264
998	0,997	236,521	3608,99	1,71E-06	98,31564	131185,8	32631,09	42,47563	70,024	0,000599	0,799778	0,199056	0,000259	0,000427	1,656291	3090,884	514,4647	0,676931	1,307505	29,3161	0,002699
999	0,998	236,58	3609,666	1,71E-06	65,54376	131153,1	32663,82	42,51824	71,024	0,0004	0,799733	0,199254	0,000259	0,000433	1,104509	3091,523	515,0344	0,677805	1,326567	22,03248	0,002778
1000	0,999	236,638	3610,331	1,72E-06	32,77188	131120,3	32696,55	42,56084	72,024	0,0002	0,799689	0,199453	0,00026	0,000439	0,552411	3092,151	515,6034	0,678678	1,345637	14,71842	0,002897
1001	1	236,694	3610,962	1,72E-06	0	131087,5	32729,28	42,60344	73,024	0	0,799644	0,199651	0,00026	0,000446	0	3092,747	516,1704	0,67955	1,364714	7,374065	0,003133

Realizando el sumatorio de la masa de catalizador que se necesita en cada incremento de conversión se llega a que se necesitan 1,14 kg de catalizador por tubo y, englobándolo a los 468 tubos que componen el reactor, se concluye que son necesarios 533,4 kg de catalizador para todo el reactor de alquilación.

La capacidad que tiene un tubo de este reactor se calcula de la siguiente forma:

$$V_{tubo} = \pi * \frac{D_I^2}{4} * L$$
$$V_{tubo} = \pi * \frac{(2,19 * 10^{-2})^2}{4} * 6$$
$$V_{tubo} = 0,00226 \text{ m}^3 = 2,26 \text{ L}$$

El espacio que ocuparía el catalizador será el siguiente:

$$V_{cat} = \frac{m}{\rho} = \frac{1,14}{1200} = 0,00095 \text{ m}^3 = 0,95 \text{ L}$$

Por lo tanto, el porcentaje que ocupa el catalizador en los tubos es:

$$\% \text{ catalizador} = \frac{V_{cat}}{V_{tubo}} * 100 = \frac{0,95}{2,26} * 100 = 42\%$$

Dicho valor corrobora que la ocupación del catalizador en los tubos no es ni la mitad del volumen de los tubos por lo que las pérdidas de carga no serían muy significativas.

## ANEXO 5. CÁLCULO DE LA MASA DE CATALIZADOR NECESARIA EN EL REACTOR DE TRANSALQUILACIÓN

Una vez realizado el diseño mecánico del reactor y calculado su coeficiente global de transferencia de calor ( $U$ ), es necesario calcular la masa de catalizador por tubo que es necesaria para conseguir los objetivos marcados.

Para este cálculo, al igual que en el reactor de alquilación, se plantea la resolución simultánea de la ecuación de diseño del reactor y el balance de energía del reactor ya que como el reactor no se encuentra en carácter isotérmico, es necesario realizar estos cálculos para intervalos pequeños de conversión dentro del reactor donde el incremento de la temperatura sea mínimo. Es por ello, que las ecuaciones a resolver son ecuaciones diferenciales ordinarias las cuales a causa de su complejidad no es posible su resolución a través de la integración directa y será necesario recurrir a métodos numéricos. Las ecuaciones que será necesario resolver son las mismas que en el reactor de alquilación:

$$\frac{dW_t}{dX_A} = \frac{(w_{A,0})_t}{[-r'_A(T, X_A)]}$$

**Ecuación A.5.1: Ecuación de diseño R. Alquilación**

Froment, G.F., Bischoff, K.B. (1990)

$$\frac{dT}{dX_A} = \left[ \frac{\Delta H}{v_A} + \frac{4U(T_R - T)}{\rho_L d_t (-r'_A)} \right] \frac{(w_{A,0})_t}{w_t C_{p,f}}$$

**Ecuación A.5.2: Balance de Energía R. Alquilación**

Froment, G.F., Bischoff, K.B. (1990)

Al igual que en el reactor anterior, el método numérico que se lleva a cabo es el método numérico de Euler, el cual se utiliza para resolver ecuaciones diferenciales ordinarias a partir de un valor inicial dado. Este método calcula de forma aproximada el valor de la solución y en el punto de abscisa  $x_1$  y con este punto aproximado ya calculado se puede repetir el método para obtener otro punto aproximado  $(x_2, y_2)$  y así sucesivamente.

Es habitual en este método tomar abscisas a la misma distancia, tomando  $h$  como el paso del método entre un punto de abscisas y otro.

Desde el punto de vista geométrico, se tiene, en definitiva, que el método de Euler se aproxima a la función solución por medio de una línea poligonal, la aproximación será mejor cuanto más pequeño sea el paso que se tome del método,  $h$ . (C. Chapra y C. Canale, 2015)

La reacción que se produce en este reactor es la reacción de transalquilación, la cual se hace reaccionar el DIPB formado con el benceno recirculado para formar cumeno. Esta reacción sigue una cinética de segundo orden global y de primer orden parcial respecto a ambos reactivos:

$$-r'_A = k_3 * C_{DIPB} * C_B$$

**Ecuación A.5.3: Velocidad de la reacción de Transalquilación**

Siendo:

$k_3 \rightarrow$  la constante de velocidad de la reacción de transalquilación  $kg/mol * s$

$C_B \rightarrow$  la concentración de benceno  $mol/m^3$

$C_{DIPB} \rightarrow$  la concentración de DIPB  $mol/m^3$

Esta reacción, al igual que las dos anteriores, depende de la temperatura y de la cantidad de reactivos que haya en cada momento, es decir, la velocidad de reacción no es constante en todo el proceso, para ello será necesario calcular dicha constante de velocidad para cada temperatura en cada intervalo de conversión, se presentan las constantes cinéticas de la reacción obtenidas de la patente de Luyben, W.L. (2010):

<b>Tabla A.5.1: Constantes cinéticas R. Transalquilación</b>	
$K_o (kg/(mol*s))$	7000
$E_a (kJ/kmol)$	1,12E+04

Dicha constante de velocidad se calcula mediante la ecuación de Arrhenius:

$$k = k_o * e^{\frac{-E_a}{R*T}}$$

**Ecuación A.5.5: Ecuación de Arrhenius**

Los valores que permanecen constantes en todo el cálculo de la masa de catalizador se muestran en la siguiente tabla:

<b>Tabla A.5.2: Constantes R. Transalquilación</b>	
U(W/m <sup>2</sup> *K)	15
Temperatura refrigerante(C)	100
Temperatura inicial (C)	170
densidad zeolita(kg/m <sup>3</sup> )	1200
Concentración inicial DIPB (mol/m <sup>3</sup> )	0,21
Concentración inicial benceno (mol/m <sup>3</sup> )	1,67
Caudal másico por tubo (kg/s)	6,72E-04
Caudal molar por tubo (mol/s)	7,67E-03
ko(kg/mol*s)	7000
Ea(J/mol)	1,12E+04
Diámetro del tubo(m)	8,60E-03
Entalpía de reacción(J/mol)	-10800
Paso, h	0,001

La densidad del catalizador ha sido obtenida de su ficha técnica proporcionada por ZeolithMed™.

A partir de estos datos y de la ecuación de velocidad, de diseño y el balance de energía para este reactor se realiza a través del software Microsoft Excel 2019™ el pertinente método numérico.

Los datos termodinámicos como la entalpía de reacción y las capacidades caloríficas a diferentes temperaturas han sido obtenidos del software Aspen Plus™ V.9.

**DISEÑO DE UN PROCESO DE PRODUCCIÓN DE CUMENO MEDIANTE UN REACTOR DE  
ALQUILACIÓN Y UN REACTOR DE TRANSALQUILACIÓN CATALÍTICOS.**

**Tabla A.5.3: CALCULO DE MASA DE CATALIZADOR NECESARIA PARA EL REACTOR DE TRANSALQUILACIÓN**

	$X_A$	$T(^{\circ}C)$	$C_p (J/kg^{\circ}K)$	$k (kg/mol^{\circ}s)$	[DIPB] (mol/m <sup>3</sup> )	[Benceno] (mol/m <sup>3</sup> )	[Cumeno] (mol/m <sup>3</sup> )	frac DIPB	frac Benceno	frac Cumeno	$C_p$ DIPB (J/kg <sup>°</sup> K)	$C_p$ Benceno (J/kg <sup>°</sup> K)	$C_p$ Cumeno (J/kg <sup>°</sup> K)	-ra' (mol/kg <sup>°</sup> s)	Masa de catalizador (kg)
1	0	170	2352,2931	334,53799	0,2088235	1,6705882	0	0,1111111	0,8888889	0	2354,8608	2351,9722	2284,7211	0	0
2	0,001	170,052	2352,598	334,65832	0,2086147	1,6703794	0,0004176	0,111	0,8887778	0,0002222	2355,0641	2352,3069	2284,9462	116,7063	6,5738E-08
3	0,002	170,105	2352,9027	334,77864	0,2084059	1,6701706	0,0008353	0,1108889	0,8886667	0,0004444	2355,2674	2352,6415	2285,1713	116,61695	1,3153E-07
4	0,003	170,157	2353,2075	334,89896	0,2081971	1,6699618	0,0012529	0,1107778	0,8885556	0,0006667	2355,4707	2352,9762	2285,3963	116,52753	1,9736E-07
5	0,004	170,21	2353,5121	335,01928	0,2079882	1,6697529	0,0016706	0,1106667	0,8884444	0,0008889	2355,6739	2353,3108	2285,6213	116,43805	2,6325E-07
6	0,005	170,262	2353,8167	335,1396	0,2077794	1,6695441	0,0020882	0,1105556	0,8883333	0,0011111	2355,8771	2353,6453	2285,8463	116,3485	3,2919E-07
7	0,006	170,314	2354,1212	335,25992	0,2075706	1,6693353	0,0025059	0,1104444	0,8882222	0,0013333	2356,0803	2353,9798	2286,0712	116,25889	3,9518E-07
8	0,007	170,367	2354,4257	335,38024	0,2073618	1,6691265	0,0029235	0,1103333	0,8881111	0,0015556	2356,2834	2354,3143	2286,2962	116,16921	4,6123E-07
9	0,008	170,419	2354,7301	335,50056	0,2071529	1,6689176	0,0033412	0,1102222	0,888	0,0017778	2356,4865	2354,6487	2286,5211	116,07946	5,2732E-07
10	0,009	170,471	2355,0345	335,62087	0,2069441	1,6687088	0,0037588	0,1101111	0,8878889	0,002	2356,6896	2354,9831	2286,7459	115,98965	5,9346E-07
11	0,01	170,524	2355,3388	335,74119	0,2067353	1,6685	0,0041765	0,11	0,8877778	0,0022222	2356,8927	2355,3174	2286,9708	115,89978	6,5966E-07
12	0,011	170,576	2355,643	335,8615	0,2065265	1,6682912	0,0045941	0,1098889	0,8876667	0,0024444	2357,0957	2355,6517	2287,1956	115,80984	7,2591E-07
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
990	0,989	218,851	2626,6668	452,49372	0,0022971	1,4640618	0,4130529	0,0012222	0,779	0,2197778	2544,4161	2664,0566	2494,5961	1,6599134	0,00025521
991	0,99	218,896	2626,9088	452,607	0,0020882	1,4638529	0,4134706	0,0011111	0,7788889	0,22	2544,5906	2664,3438	2494,7893	1,5217527	0,00026025
992	0,991	218,94	2627,1496	452,71977	0,0018794	1,4636441	0,4138882	0,001	0,7787778	0,2202222	2544,7642	2664,6297	2494,9815	1,3835605	0,00026579
993	0,992	218,985	2627,3889	452,83193	0,0016706	1,4634353	0,4143059	0,0008889	0,7786667	0,2204444	2544,9369	2664,9141	2495,1727	1,245337	0,00027194
994	0,993	219,029	2627,6263	452,94332	0,0014618	1,4632265	0,4147235	0,0007778	0,7785556	0,2206667	2545,1084	2665,1964	2495,3626	1,1070825	0,00027887
995	0,994	219,073	2627,8615	453,05373	0,0012529	1,4630176	0,4151412	0,0006667	0,7784444	0,2208889	2545,2784	2665,4762	2495,5508	0,9687972	0,00028678
996	0,995	219,116	2628,0935	453,16282	0,0010441	1,4628088	0,4155588	0,0005556	0,7783333	0,2211111	2545,4463	2665,7527	2495,7367	0,8304815	0,00029601
997	0,996	219,159	2628,3211	453,27007	0,0008353	1,4626	0,4159765	0,0004444	0,7782222	0,2213333	2545,6114	2666,0246	2495,9195	0,6921357	0,00030709
998	0,997	219,2	2628,5423	453,37457	0,0006265	1,4623912	0,4163941	0,0003333	0,7781111	0,2215556	2545,7723	2666,2894	2496,0976	0,5537606	0,00032093
999	0,998	219,24	2628,7526	453,47447	0,0004176	1,4621824	0,4168118	0,0002222	0,778	0,2217778	2545,926	2666,5425	2496,2679	0,4153569	0,00033939
1000	0,999	219,276	2628,9413	453,5652	0,0002088	1,4619735	0,4172294	0,0001111	0,7778889	0,222	2546,0657	2666,7724	2496,4225	0,2769261	0,00036707
1001	1	219,301	2629,0653	453,62839	0	1,4617647	0,4176471	0	0,7777778	0,2222222	2546,1629	2666,9325	2496,5301	0,1384709	0,00042243

Realizando el sumatorio de la masa de catalizador que se necesita en cada incremento de conversión se llega a que se necesitan 0,06 kg de catalizador por tubo y esto englobándolo a los 204 tubos que componen el reactor se concluye que son necesarios 12,18 kg de catalizador para todo el reactor de transalquilación.

La capacidad que tiene un tubo de este reactor se calcula de la siguiente forma:

$$V_{tubo} = \pi * \frac{D_I^2}{4} * L$$
$$V_{tubo} = \pi * \frac{(8,6 * 10^{-3})^2}{4} * 1,75$$
$$V_{tubo} = 1,01 * 10^{-4} m^3 = 1,01 * 10^{-1} L$$

El espacio que ocuparía el catalizador será el siguiente:

$$V_{cat} = \frac{m}{\rho} = \frac{0,06}{1200} = 5 * 10^{-5} m^3 = 5 * 10^{-2} L$$

Por lo tanto, el porcentaje que ocupa el catalizador en los tubos es:

$$\% catalizador = \frac{V_{cat}}{V_{tubo}} * 100 = \frac{5 * 10^{-2}}{1,01 * 10^{-1}} * 100 = 49\%$$

Dicho valor corrobora que la ocupación del catalizador en los tubos no es ni la mitad del volumen de los tubos por lo que las pérdidas de carga no serían muy significativas.



## ANEXO 6. CÁLCULO DE LA CAÍDA DE PRESIÓN EN EL REACTOR DE ALQUILACIÓN

Un parámetro importante a tener en cuenta en el diseño de un reactor empacado es la caída de presión que se origina entre la entrada y la salida del mismo. Esta caída de presión si es muy elevada puede originar problemas mecánicos y en la función desempeñada por el reactor.

La pérdida de presión originada por la fricción del fluido y le catalizador se puede calcular de varias formas. En este caso la ecuación seleccionada es la ecuación de Ergun.

La ecuación de Ergun que calcula la caída de presión por unidad de longitud es la siguiente:

$$\frac{P_L - P_o}{L} = -\frac{G_s}{\rho * D_p} \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3} \left[ 150 \frac{(1 - \varepsilon)\mu}{D_p} + 1,75 * G_s \right]$$

**Ecuación 3: Ecuación de Ergun. Hill, C.G. Ed. John  
Wiley & Sons (1979)**

Donde:

$P_L$ : Presión al final del tubo (Pa).

$P_o$ : Presión al inicio del tubo (Pa).

$L$ : Longitud del tubo (m).

$G_s$ : Velocidad del fluido ( $kg/m^2 * s$ )

$\varepsilon$ : Porosidad del catalizador

$D_p$ : Diámetro de la partícula (m)

Las partículas de catalizador utilizadas en este reactor tienen forma esférica con un diámetro de 10 mm. Para el cálculo de la porosidad del empaquetamiento se emplearán correlaciones que estimen dicha porosidad y así poder calcular las pérdidas de carga.

Dichas correlaciones son obtenidas del artículo científico elaborado por Zehua Guo, Zhongning Sun, Nan Zhang y Xiaxin Cao (2019). Para este caso se utiliza la correlación de Zou and You para diámetros pequeños.



$$\varepsilon = 0,681 - 1,363 \frac{D_p}{D_t} + 2,241 \left( \frac{D_p}{D_t} \right)^2$$

$$\varepsilon = 0,681 - 1,363 \frac{1}{2,19} + 2,241 \left( \frac{1}{2,19} \right)^2$$

$$\varepsilon = 0,526$$

Aplicando la ecuación de Ergun:

$$\frac{P_L - P_o}{L} = - \frac{101,9}{657 * 0,01} \frac{1 - 0,526}{0,526^3} \left[ 150 \frac{(1 - 0,526) * 1,127 * 10^{-4}}{0,01} + 1,75 * 101,9 \right]$$

$$\frac{P_L - P_o}{L} = - - 9048,76 Pa * \frac{1 bar}{100.000 Pa} = -0,09 ba$$

Teniendo 6 metros de cada tubo y una presión inicial de 35 bar queda que la presión a la salida del reactor es:

$$\frac{P_o - P_L}{L} = 0,09 bar$$

$$P_L = P_o - 0,09 * L$$

$$P_L = 35 - 0,09 * 6$$

$$P_L = 34,46 bar$$

La caída de presión dentro del reactor es mínima lo que no conlleva problemas mecánicos ni en el trabajo del reactor, por lo cual se puede aceptar dicha caída de presión y no es necesario implementar un sistema de bombeo lo que incrementa de forma innecesaria los costes de operación.

## ANEXO 7. CÁLCULO DE LA CAÍDA DE PRESIÓN EN EL REACTOR DE TRANSALQUILACIÓN

De igual forma que en el reactor de alquilación hay que tener en cuenta en el diseño, la caída de presión que se origina entre la entrada y la salida del mismo. Esta caída de presión si es muy elevada puede originar problemas mecánicos y en la función desempeñada por el reactor.

La pérdida de presión originada por la fricción del fluido y le catalizador se puede calcular de varias formas. En este caso la ecuación seleccionada es la ecuación de Ergun.

La ecuación de Ergun que calcula la caída de presión por unidad de longitud es la siguiente:

$$\frac{P_L - P_o}{L} = -\frac{G_s}{\rho * D_p} \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3} \left[ 150 \frac{(1 - \varepsilon)\mu}{D_p} + 1,75 * G_s \right]$$

**Ecuación 3: Ecuación de Ergun. Hill, C.G. Ed. John  
Wiley & Sons (1979)**

Donde:

$P_L$ : Presión al final del tubo (Pa).

$P_o$ : Presión al inicio del tubo (Pa).

$L$ : Longitud del tubo (m).

$G_s$ : Velocidad del fluido ( $kg/m^2 * s$ )

$\varepsilon$ : Porosidad del catalizador

$D_p$ : Diámetro de la partícula (m)

Las partículas de catalizador utilizadas en este reactor tienen forma esférica, como el anterior, con un diámetro ahora de 3 mm. Para el cálculo de la porosidad del empaquetamiento se empleará la misma correlación de Zou and You que se empleó en el reactor de alquilación para estimar la porosidad y calcular las pérdidas de carga.

$$\varepsilon = 0,681 - 1,363 \frac{D_p}{D_t} + 2,241 \left( \frac{D_p}{D_t} \right)^2$$

$$\varepsilon = 0,681 - 1,363 \frac{3}{8,6} + 2,241 \left( \frac{3}{8,6} \right)^2$$

$$\varepsilon = 0,478$$

Aplicando la ecuación de Ergun:

$$\frac{P_L - P_o}{L} = - \frac{632}{672,4 * 0,003} \frac{1 - 0,478}{0,478^3} \left[ 150 \frac{(1 - 0,478) * 1,241 * 10^{-4}}{0,003} + 1,75 * 632 \right]$$

$$\frac{P_L - P_o}{L} = - - 16610,4 Pa * \frac{1 bar}{100.000 Pa} = -0,166 ba$$

Teniendo 6 metros de cada tubo y una presión inicial de 35 bar queda que la presión a la salida del reactor es:

$$\frac{P_o - P_L}{L} = 0,166 bar$$

$$P_L = P_o - 0,166 * L$$

$$P_L = 35 - 0,166 * 1,75$$

$$P_L = 34,71 bar$$

La caída de presión dentro del reactor es mínima lo que no conlleva problemas mecánicos ni en el trabajo del reactor, por lo cual se puede aceptar dicha caída de presión y no es necesario implementar un sistema de bombeo lo que incrementa de forma innecesaria los costes de operación.

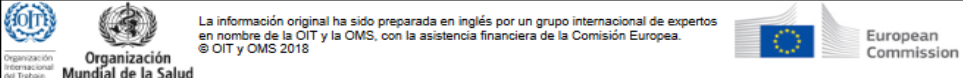
## ANEXO 8. FICHAS DE SEGURIDAD DE LOS REACTIVOS


### PROPILENO

<b>PROPILENO</b> Metiltileno Propeno Metilteno CAS: 115-07-1 Nº ONU: 1077 CE: 204-062-1	ICSC: 0559  <b>Noviembre 1998</b>
---	---

	PELIGROS	PREVENCIÓN	LUCHA CONTRA INCENDIOS
<b>INCENDIO Y EXPLOSIÓN</b>	Extremadamente inflamable. Las mezclas gas/aire son explosivas.	Evitar las llamas, NO producir chispas y NO fumar. Sistema cerrado, ventilación, equipo eléctrico y de alumbrado a prueba de explosión. Evitar la generación de cargas electrostáticas (p. ej., mediante conexión a tierra) si aparece en estado líquido.	Cortar el suministro; si no es posible y no existe riesgo para el entorno próximo, dejar que el incendio se extinga por sí mismo; en otros casos apagar con polvo, dióxido de carbono. En caso de incendio: mantener fría la botella rociando con agua. NO poner en contacto directo con agua. Combatir el incendio desde un lugar protegido.

	SÍNTOMAS	PREVENCIÓN	PRIMEROS AUXILIOS
<b>Inhalación</b>	Somnolencia. Asfixia. Ver Notas.	Usar ventilación.	Aire limpio, reposo. Puede ser necesaria respiración artificial. Proporcionar asistencia médica.
<b>Piel</b>	EN CONTACTO CON LÍQUIDO: CONGELACIÓN.	Guantes aislantes del frío.	EN CASO DE CONGELACIÓN: aclarar con agua abundante, NO quitar la ropa. Proporcionar asistencia médica.
<b>Ojos</b>	Ver Piel.	Utilizar gafas de protección de montura integral o pantalla facial.	Enjuagar con agua abundante durante varios minutos (quitar las lentes de contacto si puede hacerse con facilidad), después proporcionar asistencia médica.
<b>Ingestión</b>		No comer, ni beber, ni fumar durante el trabajo.	

DERRAMES Y FUGAS	CLASIFICACIÓN Y ETIQUETADO
¡Evacuar la zona de peligro! ¡Consultar a un experto! Ventilar. Eliminar toda fuente de ignición. NO verter NUNCA chorros de agua sobre el líquido. Protección personal: traje de protección química, incluyendo equipo autónomo de respiración.	Conforme a los criterios del GHS de la ONU
<b>ALMACENAMIENTO</b>	Transporte
A prueba de incendio. Fresco.	Clasificación ONU
<b>ENVASADO</b>	Clase de Peligro ONU: 2.1
 <p>La información original ha sido preparada en inglés por un grupo internacional de expertos en nombre de la OIT y la OMS, con la asistencia financiera de la Comisión Europea. © OIT y OMS 2018</p>	

<b>PROPILENO</b>	<b>ICSC: 0559</b>
<b>INFORMACIÓN FÍSICO-QUÍMICA</b>	
<b>Estado físico; aspecto</b> GAS INCOLORO COMPRIMIDO LÍQUIDO.  <b>Peligros físicos</b> El gas es más denso que el aire y puede extenderse a ras del suelo; posible ignición en punto distante. El gas es más denso que el aire y puede acumularse en las zonas más bajas produciendo una deficiencia de oxígeno. Como resultado del flujo, agitación, etc., se pueden generar cargas electrostáticas.  <b>Peligros químicos</b> Reacciona violentamente con oxidantes. Esto genera peligro de incendio y explosión.	Fórmula: C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> / CH <sub>2</sub> -CH=CH <sub>2</sub> Masa molecular: 42.1 Punto de ebullición: -48°C Punto de fusión: -185°C Densidad relativa (agua = 1): 0.5 Solubilidad en agua: escasa Presión de vapor, kPa a 20°C: 1158 Densidad relativa de vapor (aire = 1): 1.5 Punto de inflamación: gas inflamable Temperatura de autoignición: 460°C Límites de explosividad, % en volumen en el aire: 2.4-10.3 Coeficiente de reparto octanol/agua como log Pow: 1.77
<b>EXPOSICIÓN Y EFECTOS SOBRE LA SALUD</b>	
<b>Vías de exposición</b> La sustancia se puede absorber por inhalación.  <b>Efectos de exposición de corta duración</b> La evaporación rápida del líquido puede producir congelación. La sustancia puede afectar al sistema nervioso central. La exposición podría causar disminución del estado de alerta. Ver Notas.	<b>Riesgo de inhalación</b> Al producirse pérdidas en zonas confinadas, esta sustancia puede originar asfixia por disminución del contenido de oxígeno en el aire.  <b>Efectos de exposición prolongada o repetida</b>
<b>LÍMITES DE EXPOSICIÓN LABORAL</b>	
TLV: 500 ppm como TWA; A4 (no clasificado como cancerígeno humano)	
<b>MEDIO AMBIENTE</b>	
<b>NOTAS</b>	
Altas concentraciones en el aire producen una deficiencia de oxígeno con riesgo de pérdida de conocimiento o muerte. Comprobar el contenido de oxígeno antes de entrar en la zona. Con el fin de evitar la fuga de gas en estado líquido, girar la botella que tenga un escape manteniendo arriba el punto de escape.	
<b>INFORMACIÓN ADICIONAL</b>	
- Límites de exposición profesional (INSHT 2012): VLA-ED: 500 ppm - N° de índice (clasificación y etiquetado armonizados conforme al Reglamento CLP de la UE): 601-011-00-9 - Clasificación UE Pictograma: F+, R: 12; S: (2)-9-16-33	
 <p>La calidad y exactitud de la traducción o el posible uso que se haga de esta información no es responsabilidad de la OIT, la OMS ni la Comisión Europea. © Versión en español, INSST, 2018</p>	


# DISEÑO DE UN PROCESO DE PRODUCCIÓN DE CUMENO MEDIANTE UN REACTOR DE ALQUILACIÓN Y UN REACTOR TRANSALQUILACIÓN CATALÍTICOS.

## BENCENO

<b>BENCENO</b> Ciclohexatrieno Benzol	ICSC: 0015 Noviembre 2016
CA 5: 71-43-2 N° ONU: 1114 CE: 200-753-7	

	PELIGROS	PREVENCIÓN	LUCHA CONTRA INCENDIOS
<b>INCENDIO Y EXPLOSIÓN</b>	Altamente inflamable. Las mezclas vapor/aire son explosivas. Riesgo de incendio y explosión. Ver Peligros Químicos.	Evitar las llamas, NO producir chispas y NO fumar. Sistema cerrado, ventilación, equipo eléctrico y de alumbrado a prueba de explosión. NO utilizar aire comprimido para llenar, vaciar o manipular. Utilícense herramientas manuales no generadoras de chispas. Evitar la generación de cargas electrostáticas (p. ej., mediante conexión a tierra).	Usar espuma, agua pulverizada, dióxido de carbono, polvo. En caso de incendio: mantener fríos los bidones y demás instalaciones rociando con agua.

¡EVITAR TODO CONTACTO!			
	SÍNTOMAS	PREVENCIÓN	PRIMEROS AUXILIOS
<b>Inhalación</b>	Vértigo. Somnolencia. Dolor de cabeza. Náuseas. Jadeo. Convulsiones. Pérdida del conocimiento.	Usar ventilación, extracción localizada o protección respiratoria.	Aire limpio, reposo. Proporcionar asistencia médica.
<b>Piel</b>	¡PUEDE ABSORBERSE! Piel seca. Enrojecimiento. Dolor. Además ver Inhalación.	Guantes de protección. Traje de protección.	Quitar las ropas contaminadas. Aclarar la piel con agua abundante o ducharse. Proporcionar asistencia médica.
<b>Ojos</b>	Enrojecimiento. Dolor.	Utilizar pantalla facial o protección ocular en combinación con protección respiratoria.	Enjuagar con agua abundante durante varios minutos (quitar las lentes de contacto si puede hacerse con facilidad), después proporcionar asistencia médica.
<b>Ingestión</b>	Dolor abdominal. Dolor de garganta. Vómitos. Además ver Inhalación.	No comer, ni beber, ni fumar durante el trabajo.	Enjuagar la boca. NO provocar el vómito. Proporcionar asistencia médica.

DERRAMES Y FUGAS	CLASIFICACIÓN Y ETIQUETADO
<p>Eliminar toda fuente de ignición. ¡Evacuar la zona de peligro! ¡Consultar a un experto!</p> <p>Protección personal: traje de protección completo incluyendo equipo autónomo de respiración. NO verterlo en el alcantarillado. NO permitir que este producto químico se incorpore al ambiente. Recoger, en la medida de lo posible, el líquido que se derrama y el ya derramado en recipientes precintables. Absorber el líquido residual en arena o absorbente inerte. A continuación, almacenar y eliminar el residuo conforme a la normativa local.</p>	<p>Conforme a los criterios del GHS de la ONU</p> <div style="text-align: center;">  <p><b>PELIGRO</b></p> </div> <p>Líquido y vapores muy inflamables Puede ser mortal en caso de ingestión y de penetración en las vías respiratorias Provoca irritación cutánea Provoca irritación ocular grave Puede provocar defectos genéticos</p>
ALMACENAMIENTO	<p>Puede provocar cáncer Provoca daños en la médula ósea y el sistema nervioso central tras exposiciones prolongadas o repetidas Nocivo para los organismos acuáticos, con efectos nocivos duraderos</p> <p><b>Transporte</b> <b>Clasificación ONU</b> Clase de Peligro ONU: 3; Grupo de Embalaje/Envase ONU: II</p>
ENVASADO	
No transportar con alimentos y piensos.	



Organización  
Internacional  
del Trabajo



Organización  
Mundial de la Salud

La información original ha sido preparada en inglés por un grupo internacional de expertos en nombre de la OIT y la OMS, con la asistencia financiera de la Comisión Europea.  
© OIT y OMS 2018



European  
Commission

# DISEÑO DE UN PROCESO DE PRODUCCIÓN DE CUMENO MEDIANTE UN REACTOR DE ALQUILACIÓN Y UN REACTOR TRANSALQUILACIÓN CATALÍTICOS.

BENCENO

IC 8C: 0016

INFORMACIÓN FÍSICO-QUÍMICA	
<b>Estado físico; aspecto</b> LÍQUIDO INCOLORO DE OLOR CARACTERÍSTICO.	<b>Fórmula:</b> C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> <b>Masa molecular:</b> 78.1 <b>Punto de ebullición:</b> 80°C <b>Punto de fusión:</b> 6°C <b>Densidad relativa (agua = 1):</b> 0.88 <b>Solubilidad en agua, g/100ml a 25°C:</b> 0.18 <b>Presión de vapor, kPa a 20°C:</b> 10 <b>Densidad relativa de vapor (aire = 1):</b> 2.7 <b>Densidad relativa de la mezcla vapor/aire a 20°C (aire = 1):</b> 1.2 <b>Punto de inflamación:</b> -11°C c.c. <b>Temperatura de autoignición:</b> 498°C <b>Límites de explosividad, % en volumen en el aire:</b> 1.2-8.0 <b>Coefficiente de reparto octanol/agua como log Pow:</b> 2.13
<b>Peligros físicos</b> El vapor es más denso que el aire y puede extenderse a ras del suelo; posible ignición en punto distante. Como resultado del flujo, agitación, etc., se pueden generar cargas electrostáticas.	
<b>Peligros químicos</b> Reacciona violentamente con oxidantes, ácido nítrico, ácido sulfúrico y halógenos. Esto genera peligro de incendio y explosión. Ataca los plásticos y el caucho.	

EXPOSICIÓN Y EFECTOS SOBRE LA SALUD	
<b>Vías de exposición</b> La sustancia se puede absorber por inhalación, a través de la piel y por ingestión.	<b>Riesgo de inhalación</b> Por evaporación de esta sustancia a 20°C se puede alcanzar muy rápidamente una concentración nociva en el aire.
<b>Efectos de exposición de corta duración</b> La sustancia irrita los ojos, la piel y el tracto respiratorio. La ingestión del líquido puede dar lugar a la aspiración del mismo por los pulmones y a la consiguiente neumonitis química. La sustancia puede afectar al sistema nervioso central. Esto puede dar lugar a disminución del estado de alerta. La exposición muy por encima del LEP podría causar pérdida del conocimiento y la muerte. En caso de ingestión la sustancia penetra fácilmente en las vías respiratorias y puede provocar neumonía por aspiración.	<b>Efectos de exposición prolongada o repetida</b> La sustancia desengrasa la piel, lo que puede producir sequedad y agrietamiento. La sustancia puede afectar al sistema nervioso central y al sistema inmunológico. La sustancia puede afectar a la médula ósea. Esto puede dar lugar a anemia. Esta sustancia es carcinógena para los seres humanos. Puede causar daño genético hereditario en células germinales humanas. Ver Notas.

LÍMITES DE EXPOSICIÓN LABORAL
TLV: 0.5 ppm como TWA; 2.5 ppm como STEL; (piel); A1 (cancerígeno humano confirmado); BEI establecido. EU-OEL: 3.25 mg/m <sup>3</sup> , 1 ppm como TWA; (piel). MAK: cancerígeno: categoría 1; mutágeno: categoría 3A; absorción dérmica (H)

MEDIO AMBIENTE
La sustancia es tóxica para los organismos acuáticos. La sustancia puede causar efectos prolongados en el medio acuático.

NOTAS
El consumo de bebidas alcohólicas aumenta el efecto nocivo. Está indicado un examen médico periódico dependiendo del grado de exposición. La alerta por el olor cuando se supera el límite de exposición es insuficiente. El benceno causa leucemia mieloide aguda/leucemia no linfocítica aguda. También se ha observado una asociación positiva entre la exposición a benceno y leucemia linfocítica aguda, leucemia linfocítica crónica, mieloma múltiple y linfoma no Hodgkin.

INFORMACIÓN ADICIONAL
- Límites de exposición profesional (INSHT 2017): VLA-ED: 1 ppm; 3,25 mg/m <sup>3</sup> C1A (Sustancia carcinogénica de categoría 1A). M1B (Sustancia mutagénica de categoría 1B). Notas: vía dérmica. Real Decreto 1124/2000, por el que se modifica el Real Decreto 665/1997, sobre la protección de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición a agentes cancerígenos durante el trabajo. Esta sustancia tiene establecidas restricciones a la fabricación, la comercialización o el uso especificadas en el Reglamento REACH. VLB: 0,045 mg/g creatinina en orina de ácido S-Fenilmercaptúrico; 2 mg/L en orina de ácido t,l-Mucónico. - N° de índice (clasificación y etiquetado armonizados conforme al Reglamento CLP de la UE): 601-020-00-8 - Clasificación UE Pictograma: F, T, R: 45-46-11-36/38-48/23/24/25-65; S: 53-45; Nota: E

# DISEÑO DE UN PROCESO DE PRODUCCIÓN DE CUMENO MEDIANTE UN REACTOR DE ALQUILACIÓN Y UN REACTOR TRANSALQUILACIÓN CATALÍTICOS.

## PROPANO

PROPANO		ICSC: 0319	
n-Propano		Noviembre 2003	
CAS: 74-98-6			
Nº ONU: 1978			
CE: 200-827-9			
	PELIGROS	PREVENCIÓN	LUCHA CONTRA INCENDIOS
INCENDIO Y EXPLOSIÓN	Extremadamente inflamable. Las mezclas gas/aire son explosivas.	Evitar las llamas, NO producir chispas y NO fumar. Sistema cerrado, ventilación, equipo eléctrico y de alumbrado a prueba de explosión. Evitar la generación de cargas electrostáticas (p. ej., mediante conexión a tierra) si aparece en estado líquido. Utilícense herramientas manuales no generadoras de chispas.	Cortar el suministro; si no es posible y no existe riesgo para el entorno próximo, dejar que el incendio se extinga por sí mismo; en otros casos apagar con polvo, dióxido de carbono. En caso de incendio: mantener fría la botella rociando con agua. Combatir el incendio desde un lugar protegido.
	SÍNTOMAS	PREVENCIÓN	PRIMEROS AUXILIOS
Inhalación	Somnolencia. Pérdida del conocimiento.	Usar sistema cerrado o ventilación.	Aire limpio, reposo. Puede ser necesaria respiración artificial. Proporcionar asistencia médica.
Piel	EN CONTACTO CON LÍQUIDO: CONGELACIÓN.	Guantes aislantes del frío. Traje de protección.	EN CASO DE CONGELACIÓN: aclarar con agua abundante, NO quitar la ropa. Proporcionar asistencia médica.
Ojos	EN CONTACTO CON LÍQUIDO: CONGELACIÓN.	Utilizar pantalla facial.	Enjuagar con agua abundante durante varios minutos (quitar las lentes de contacto si puede hacerse con facilidad), después proporcionar asistencia médica.
Ingestión			
DERRAMES Y FUGAS		CLASIFICACIÓN Y ETIQUETADO	
¡Evacuar la zona de peligro! ¡Consultar a un experto! Protección personal: equipo autónomo de respiración. Eliminar toda fuente de ignición. Ventilar. NO verter NUNCA chorros de agua sobre el líquido.		Conforme a los criterios del GHS de la ONU	
ALMACENAMIENTO		Transporte	
A prueba de incendio. Fresco.		Clasificación ONU	
ENVASADO		Clase de Peligro ONU: 2.1	
  <p>La información original ha sido preparada en inglés por un grupo internacional de expertos en nombre de la OIT y la OMS, con la asistencia financiera de la Comisión Europea. © OIT y OMS 2018</p>		 <p>European Commission</p>	
PROPANO		ICSC: 0319	
INFORMACIÓN FÍSICO-QUÍMICA			
Estado físico; aspecto GAS INODORO INCOLORO COMPRIMIDO LICUADO.		Fórmula: C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> / CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub> Masa molecular: 44.1 Punto de ebullición: -42°C Punto de fusión: -189.7°C Densidad relativa (agua = 1): 0.5 Solubilidad en agua, g/100ml a 20°C: 0.007 Presión de vapor, kPa a 20°C: 840 Densidad relativa de vapor (aire = 1): 1.6 Punto de inflamación: -104°C Temperatura de autoignición: 450°C Límites de explosividad, % en volumen en el aire: 2.1-9.5 Coeficiente de reparto octanol/agua como log Pow: 2.38	
Peligros físicos El gas es más denso que el aire y puede extenderse a ras del suelo; posible ignición en punto distante. El gas es más denso que el aire y puede acumularse en las zonas más bajas produciendo una deficiencia de oxígeno. Como resultado del flujo, agitación, etc., se pueden generar cargas electrostáticas.			
Peligros químicos			
EXPOSICIÓN Y EFECTOS SOBRE LA SALUD			
Vías de exposición La sustancia se puede absorber por inhalación.		Riesgo de inhalación Al producirse pérdidas en zonas confinadas, esta sustancia puede originar asfixia por disminución del contenido de oxígeno en el aire.	
Efectos de exposición de corta duración La evaporación rápida del líquido puede producir congelación. La sustancia puede afectar al sistema nervioso central.		Efectos de exposición prolongada o repetida	
LÍMITES DE EXPOSICIÓN LABORAL			
MAK: 1800 mg/m <sup>3</sup> , 1000 ppm; categoría de limitación de pico: II(4); riesgo para el embarazo: grupo D			
MEDIO AMBIENTE			
NOTAS			
Comprobar el contenido de oxígeno antes de entrar en la zona. Con el fin de evitar la fuga de gas en estado líquido, girar la botella que tenga un escape manteniendo arriba el punto de escape. Altas concentraciones en el aire producen una deficiencia de oxígeno con riesgo de pérdida de conocimiento o muerte.			
INFORMACIÓN ADICIONAL			
- Límites de exposición profesional (INSHT 2012): VLA-ED (Hidrocarburos alifáticos alcanos (C1-C4) y sus mezclas, gases): 1000 ppm - Nº de índice (clasificación y etiquetado armonizados conforme al Reglamento CLP de la UE): 601-003-00-5 - Clasificación UE Pictograma: F+; R: 12; S: (2)-9-16			
 <p>GOBIERNO DE ESPAÑA</p>  <p>MINISTERIO DE MIGRACIONES Y SEGURIDAD SOCIAL</p>		 <p>La calidad y exactitud de la traducción o el posible uso que se haga de esta información no es responsabilidad de la OIT, la OMS ni la Comisión Europea. © Versión en español, INSST, 2018</p>	




## ANEXO 9. FICHAS DE SEGURIDAD DE LOS PRODUCTOS

### CUMENO

<b>CUMENO</b> (1-Metiletil)benzeno 2-Fenilpropano Isopropilbenzeno CAS: 98-82-8 Nº ONU: 1518 CE: 202-704-5	ICSC: 0170  Abril 2014
--	------------------------------

	PELIGROS	PREVENCIÓN	LUCHA CONTRA INCENDIOS
<b>INCENDIO Y EXPLOSIÓN</b>	Inflamable. Por encima de 31°C pueden formarse mezclas explosivas vapor/aire.	Evitar las llamas, NO producir chispas y NO fumar. Por encima de 31°C, sistema cerrado, ventilación y equipo eléctrico a prueba de explosión. Evitar la generación de cargas electrostáticas (p. ej., mediante conexión a tierra).	Usar polvo, AFFF, espuma, dióxido de carbono. En caso de incendio: mantener fríos los bidones y demás instalaciones rociando con agua.

¡EVITAR TODO CONTACTO!			
	SÍNTOMAS	PREVENCIÓN	PRIMEROS AUXILIOS
<b>Inhalación</b>	Vértigo. Falta de coordinación. Somnolencia. Dolor de cabeza.	Usar ventilación, extracción localizada o protección respiratoria.	Aire limpio, reposo. Proporcionar asistencia médica.
<b>Piel</b>	Piel seca.	Guantes de protección. Traje de protección.	Quitar las ropas contaminadas. Aclarar y lavar la piel con agua y jabón.
<b>Ojos</b>	Enrojecimiento.	Utilizar gafas de protección.	Enjuagar con agua abundante (quitar las lentes de contacto si puede hacerse con facilidad).
<b>Ingestión</b>	Ver Inhalación. ¡Peligro de aspiración!	No comer, ni beber, ni fumar durante el trabajo.	Enjuagar la boca. NO provocar el vómito. Proporcionar asistencia médica inmediatamente.

<b>DERRAMES Y FUGAS</b> Protección personal: traje de protección química y respirador con filtro para gases y vapores orgánicos adaptado a la concentración de la sustancia en el aire. Recoger, en la medida de lo posible, el líquido que se derrama y el ya derramado en recipientes precintables. Absorber el líquido residual en arena o absorbente inerte. A continuación, almacenar y eliminar el residuo conforme a la normativa local. NO permitir que este producto químico se incorpore al ambiente.	<b>CLASIFICACIÓN Y ETIQUETADO</b> Conforme a los criterios del GHS de la ONU  <b>PELIGRO</b> Líquido y vapores inflamables Nocivo en caso de ingestión Susceptible de provocar cáncer Puede ser mortal en caso de ingestión y de penetración en las vías respiratorias Muy tóxico para los organismos acuáticos
<b>ALMACENAMIENTO</b> A prueba de incendio. Separado de oxidantes fuertes y ácidos. Fresco. Mantener en la oscuridad. Almacenar solamente si está estabilizado. Almacenar en un área sin acceso a desagües o alcantarillas. Medidas para contener el efluente de extinción de incendios.	<b>Transporte</b> Clasificación ONU Clase de Peligro ONU: 3; Grupo de Embalaje/Envase ONU: III
<b>ENVASADO</b> Contaminante marino.	



Organización  
Internacional  
del Trabajo



Organización  
Mundial de la Salud

La información original ha sido preparada en inglés por un grupo internacional de expertos en nombre de la OIT y la OMS, con la asistencia financiera de la Comisión Europea.  
© OIT y OMS 2018



European  
Commission



# DISEÑO DE UN PROCESO DE PRODUCCIÓN DE CUMENO MEDIANTE UN REACTOR DE ALQUILACIÓN Y UN REACTOR TRANSALQUILACIÓN CATALÍTICOS.

CUMENO

ICSC: 0170

INFORMACIÓN FÍSICO-QUÍMICA	
<b>Estado físico; aspecto</b> LÍQUIDO INCOLORO DE OLOR CARACTERÍSTICO.	<b>Fórmula:</b> $C_9H_{12}$ / $C_6H_5CH(CH_3)_2$ <b>Masa molecular:</b> 120.2 <b>Punto de ebullición:</b> 152°C <b>Punto de fusión:</b> -96°C <b>Densidad relativa (agua = 1):</b> 0.90 <b>Solubilidad en agua, g/l a 20°C:</b> 0.2 (muy escasa) <b>Presión de vapor, Pa a 20°C:</b> 427 <b>Densidad relativa de vapor (aire = 1):</b> 4.2 <b>Densidad relativa de la mezcla vapor/aire a 20°C (aire = 1):</b> 1.01 <b>Punto de inflamación:</b> 31°C c.c. <b>Temperatura de autoignición:</b> 420°C <b>Límites de explosividad, % en volumen en el aire:</b> 0.9-6.5 <b>Coefficiente de reparto octanol/agua como log Pow:</b> 3.66 <b>Viscosidad:</b> 0.85 mm <sup>2</sup> /s a 25°C

EXPOSICIÓN Y EFECTOS SOBRE LA SALUD	
<b>Vías de exposición</b> La sustancia se puede absorber por inhalación, a través de la piel y por ingestión.	<b>Riesgo de inhalación</b> La evaporación de esta sustancia a 20°C producirá bastante lentamente una concentración nociva de la misma en aire.
<b>Efectos de exposición de corta duración</b> En caso de ingestión la sustancia penetra fácilmente en las vías respiratorias y puede provocar neumonía por aspiración. La sustancia puede afectar al sistema nervioso central. La exposición muy por encima del LEP podría causar pérdida del conocimiento.	<b>Efectos de exposición prolongada o repetida</b> El contacto prolongado o repetido con la piel puede producir dermatitis. La sustancia puede afectar al hígado y al tracto respiratorio superior. Esta sustancia es posiblemente carcinógena para los seres humanos.

LÍMITES DE EXPOSICIÓN LABORAL
TLV: 50 ppm como TWA. MAK: 50 mg/m <sup>3</sup> , 10 ppm; categoría de limitación de pico: II(4); absorción dérmica (H); cancerígeno: categoría 3B; riesgo para el embarazo: grupo C. EU-OEL: 100 mg/m <sup>3</sup> , 20 ppm como TWA; 250 mg/m <sup>3</sup> , 250 ppm como STEL; (piel)

MEDIO AMBIENTE
La sustancia es muy tóxica para los organismos acuáticos. Se aconseja firmemente impedir que el producto químico se incorpore al ambiente.

NOTAS
Antes de la destilación comprobar si existen peróxidos; en caso positivo, eliminarlos. NO llevar a casa la ropa de trabajo.





INFORMACIÓN ADICIONAL
- Límites de exposición profesional (INSHT 2014): VLA-ED: 20 ppm, 100 mg/m <sup>3</sup> VLA-EC: 50 ppm, 250 mg/m <sup>3</sup> Nota: vía dérmica. - Nº de índice (clasificación y etiquetado armonizados conforme al Reglamento CLP de la UE): 601-024-00-X - <b>Clasificación UE</b> Pictograma: Xn, N; R: 10-37-51/53-65; S: (2)-24-37-61-62; Nota: C





La calidad y exactitud de la traducción o el posible uso que se haga de esta información no es responsabilidad de la OIT, la OMS ni la Comisión Europea.  
 © Versión en español, INSST, 2018

**DISEÑO DE UN PROCESO DE PRODUCCIÓN DE CUMENO MEDIANTE UN REACTOR DE ALQUILACIÓN Y UN REACTOR TRANSALQUILACIÓN CATALÍTICOS.**

DIPB

DII SOPROPILBENCENO (mezcla)			ICSC: 1714
Bis(1-metiletil)benceno			Abril 2008
CAS: 25321-09-9			
Nº ONU: 3082			
CE: 246-835-6			
	PELIGROS	PREVENCIÓN	LUCHA CONTRA INCENDIOS
INCENDIO Y EXPLOSIÓN	Combustible. Por encima de 77°C pueden formarse mezclas explosivas vapor/aire.	Evitar las llamas. Por encima de 77°C, sistema cerrado y ventilación.	Usar polvo, dióxido de carbono. En caso de incendio: mantener fríos los bidones y demás instalaciones rociando con agua.
¡EVITAR LA FORMACIÓN DE NIEBLAS DEL PRODUCTO!			
	SÍNTOMAS	PREVENCIÓN	PRIMEROS AUXILIOS
Inhalación	Dolor de cabeza. Somnolencia.	Usar ventilación.	Aire limpio, reposo.
Piel		Guantes de protección.	Aclarar y lavar la piel con agua y jabón.
Ojos		Utilizar gafas de protección.	Enjuagar con agua abundante (quitar las lentes de contacto si puede hacerse con facilidad).
Ingestión		No comer, ni beber, ni fumar durante el trabajo.	Enjuagar la boca. Reposo.
DERRAMES Y FUGAS		CLASIFICACIÓN Y ETIQUETADO	
Eliminar toda fuente de ignición. NO permitir que este producto químico se incorpore al ambiente. Ventilar. Recoger el líquido procedente de la fuga en recipientes tapados. Absorber el líquido residual en arena o absorbente inerte. A continuación, almacenar y eliminar el residuo conforme a la normativa local.		Conforme a los criterios del GHS de la ONU	
ALMACENAMIENTO			
Medidas para contener el efluente de extinción de incendios. Mantener en lugar bien ventilado. Almacenar en un área sin acceso a desagües o alcantarillas.		ATENCIÓN	
ENVASADO		Líquido combustible Puede provocar somnolencia y provocar vértigo Muy tóxico para los organismos acuáticos	
		Transporte Clasificación ONU Clase de Peligro ONU: 9; Grupo de Embalaje/Envase ONU: III	
 Organización Internacional del Trabajo	 Organización Mundial de la Salud	La información original ha sido preparada en inglés por un grupo internacional de expertos en nombre de la OIT y la OMS, con la asistencia financiera de la Comisión Europea. © OIT y OMS 2018	
			European Commission

**DISEÑO DE UN PROCESO DE PRODUCCIÓN DE CUMENO MEDIANTE UN REACTOR DE ALQUILACIÓN Y UN REACTOR TRANSALQUILACIÓN CATALÍTICOS.**

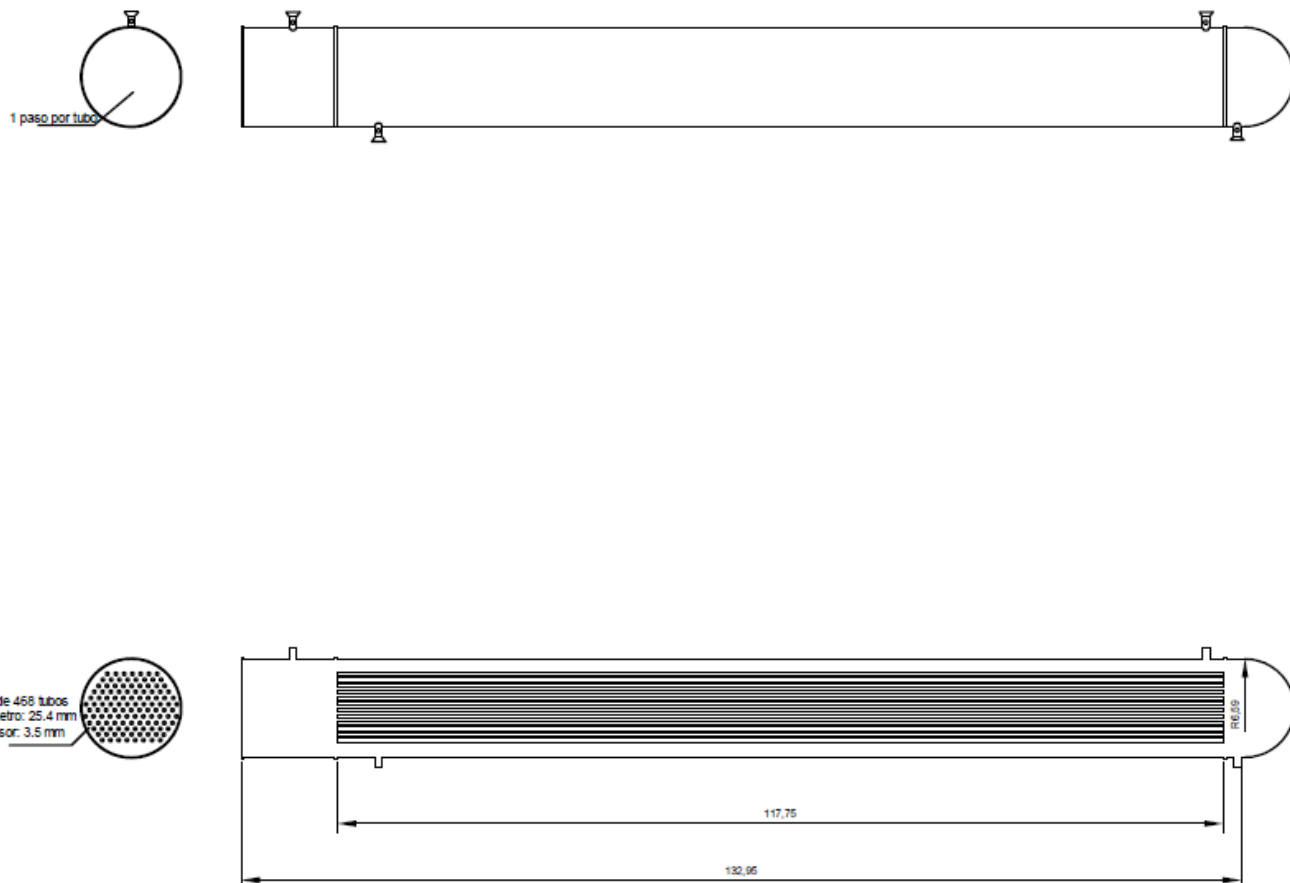
DIISOPROPILBENCENO (mezcla)		ICSC: 1714
INFORMACIÓN FÍSICO-QUÍMICA		
Estado físico; aspecto INCOLOROLÍQUIDO INCOLORO DE OLOR ACRE.	Fórmula: C <sub>12</sub> H <sub>18</sub> Masa molecular: 162.3 Punto de ebullición: 203-205°C Densidad: 0.9 g/cm³ Solubilidad en agua a 25°C: escasa Densidad relativa de vapor (aire = 1): 5.6 Densidad relativa de la mezcla vapor/aire a 20°C (aire = 1): 1 Punto de inflamación: 77°C c.a. Temperatura de autoignición: 449°C Coeficiente de reparto octanol/agua como log Pow: 5.2	
Peligros físicos		
Peligros químicos		
EXPOSICIÓN Y EFECTOS SOBRE LA SALUD		
Vías de exposición	Riesgo de inhalación No se puede indicar la velocidad con que se alcanza una concentración nociva de esta sustancia en el aire.	
Efectos de exposición de corta duración La exposición a concentraciones altas podría causar disminución del estado de alerta.	Efectos de exposición prolongada o repetida	
LÍMITES DE EXPOSICIÓN LABORAL		
MEDIO AMBIENTE		
La sustancia es muy tóxica para los organismos acuáticos. Se aconseja firmemente impedir que el producto químico se incorpore al ambiente.		
NOTAS		
Esta ficha se basa en una mezcla de m-diisopropilbenceno (CAS 99-82-7) y p-diisopropilbenceno (CAS 100-18-5).		
INFORMACIÓN ADICIONAL		
Clasificación UE		
 GOBIERNO DE ESPAÑA MINISTERIO DE TRABAJO, MIGRACIONES Y SEGURIDAD SOCIAL		 insst Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo
La calidad y exactitud de la traducción o el posible uso que se haga de esta información no es responsabilidad de la OIT, la OMS ni la Comisión Europea. © Versión en español, INSST, 2018		

# DOCUMENTO 3: PLANOS.

## Contenido

1. PLANOS DEL REACTOR DE ALQUILACIÓN.....	3
2. PLANOS DEL REACTOR DE TRANSALQUILACIÓN.....	4

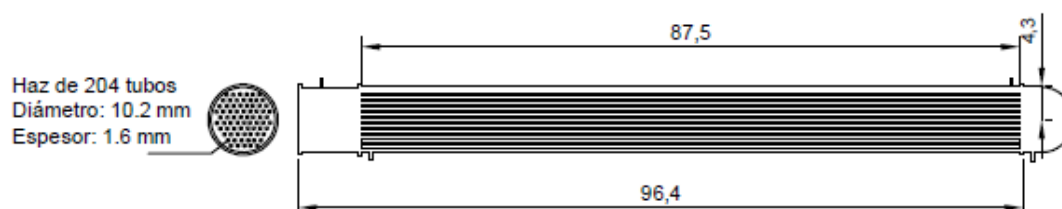
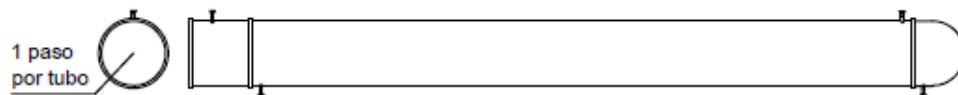
**DISEÑO DE UN PROCESO DE PRODUCCIÓN DE CUMENO MEDIANTE UN REACTOR DE  
ALQUILACIÓN Y UN REACTOR DE TRANSALQUILACIÓN CATALÍTICOS.**



UNIVERSIDAD DE CÁDIZ (FACULTAD DE CIENCIAS)		
Diseño de un Proceso de Producción de cumeno mediante un reactor de alquilación y de transalquilación catalíticos		
Ingeniería Química	REACTOR DE ALQUILACIÓN	FECHA: JULIO 2020
Firma		ESCALA: 1:50
<i>Alberto Barba Espinar</i>		PLANO 1

**DISEÑO DE UN PROCESO DE PRODUCCIÓN DE CUMENO MEDIANTE UN REACTOR DE  
ALQUILACIÓN Y UN REACTOR DE TRANSALQUILACIÓN CATALÍTICOS.**

---



**UNIVERSIDAD DE CÁDIZ (FACULTAD DE CIENCIAS)**

**Diseño de un Proceso de Producción de cumeno mediante un reactor de  
alquilación y de transalquilación catalíticos**

**Ingeniería Química**

**REACTOR  
DE  
TRANSALQUILACIÓN**

FECHA: JULIO 2020

Firma

*Alberto Barba Capinar*

ESCALA: 1:20

PLANO 2

# DOCUMENTO 4: PLIEGO DE CONDICIONES.



## Contenido

<b>1. CONDICIONES GENERALES .....</b>	<b>4</b>
<b>1.1. OBJETIVO DEL PLIEGO DE CONDICIONES.....</b>	<b>4</b>
<b>1.2. DOCUMENTO DEL PROYECTO QUE DEFINEN LAS OBRAS .....</b>	<b>4</b>
<b>1.3. NORMATIVA DE APLICACIÓN .....</b>	<b>5</b>
<b>2. CONDICIONES DE ÍNDOLE FACULTATIVA .....</b>	<b>6</b>
<b>2.1. DISPOSICIONES GENERALES .....</b>	<b>6</b>
<b>2.2. TÉRMINOS DE PLIEGO DE CONDICIONES.....</b>	<b>6</b>
<b>2.3. DIRECCIÓN FACULTATIVA .....</b>	<b>7</b>
<b>2.4. CONTRATADOR .....</b>	<b>8</b>
<b>2.5. OBRAS Y EJECUCIÓN .....</b>	<b>9</b>
<b>2.5.1. FACULTADES EN LA DIRECCIÓN DE LA OBRA.....</b>	<b>9</b>
<b>2.5.2. LIBRO DE ÓRDENES .....</b>	<b>9</b>
<b>2.5.3. INICIO DEL TRABAJO .....</b>	<b>10</b>
<b>2.5.4. REPLANTEO .....</b>	<b>10</b>
<b>2.5.5. EJECUCIÓN DE LAS OBRAS .....</b>	<b>10</b>
<b>2.5.6. MAQUINARIA.....</b>	<b>11</b>
<b>2.5.7. PUESTA A PUNTO Y PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO .....</b>	<b>11</b>
<b>2.5.8. MATERIALES .....</b>	<b>12</b>
<b>2.5.9. ENSAYOS .....</b>	<b>12</b>
<b>2.5.10. ALMACENAMIENTO .....</b>	<b>13</b>
<b>2.5.11. SEÑALIZACIÓN DE LAS OBRAS .....</b>	<b>13</b>
<b>2.5.12. PARTIDAS DE ALZADA .....</b>	<b>13</b>
<b>2.5.13. RECEPCIÓN PROVISIONAL DE LAS OBRAS .....</b>	<b>14</b>
<b>2.5.14. PERIODO DE GARANTÍAS .....</b>	<b>14</b>
<b>2.5.15. RECEPCIÓN DEFINITIVA.....</b>	<b>14</b>
<b>2.5.16. DOCUMENTO FINAL DE LA OBRA .....</b>	<b>14</b>
<b>3. CONDICIONES DE ÍNDOLE ECONÓMICA .....</b>	<b>15</b>
<b>3.1. PRINCIPIO GENERAL.....</b>	<b>15</b>
<b>3.2. FIANZAS.....</b>	<b>15</b>
<b>3.2.1. EJECUCIÓN DE TRABAJOS CON CARGO A LA FIANZA .....</b>	<b>15</b>
<b>3.2.2. DEVOLUCIÓN DE FIANZAS.....</b>	<b>16</b>
<b>3.2.3. DEVOLUCIÓN DE FIANZA EN EL CASO DE EFECTUARSE RECEPCIONES PARCIALES.....</b>	<b>16</b>
<b>3.3. PRECIOS.....</b>	<b>16</b>
<b>3.3.1. COMPOSICIÓN DE PRECIOS UNITARIOS .....</b>	<b>16</b>

3.3.2.	PRECIOS DE CONTRATA. IMPORTE DE CONTRATA .....	18
3.3.3.	PRECIOS DE CONTRADICTORIOS .....	18
3.3.4.	RECLAMACIONES DE AUMENTO DE PRECIOS POR DIVERSAS CAUSAS .....	18
3.3.5.	REVISIÓN DE LOS PRECIOS CONTRATADOS .....	18
3.3.6.	ELEMENTOS COMPRENDIDOS EN EL PRESUPUESTO .....	19
3.4.	VALORACIÓN Y ABONO DE LOS TRABAJOS .....	19
3.4.1.	FORMAS DE ABONO DE LAS OBRAS .....	19
3.4.2.	RELACIONES VALORADAS Y CERTIFICACIONES .....	20
3.5.	INDEMNIZACIONES MÚTUAS .....	20
3.5.1.	IMPORTE DE LA INDEMNIZACIÓN POR RETRASO NO JUSTIFICADO .....	20
3.5.2.	DEMORA DE LOS PAGOS .....	20
4.	CONDICIONES DE ÍNDOLE LEGAL .....	22
4.1.	DISPOSICIONES LEGALES .....	22
4.2.	CONTRATISTA .....	22
4.2.1.	OBLIGACIONES DEL CONTRATADOR .....	22
4.2.2.	RESPONSABILIDAD DEL CONTRATADOR .....	23
4.3.	LEYES LABORALES DE ACCIDENTES DE TRABAJO .....	23
4.4.	MANO DE OBRA .....	23
4.5.	DAÑOS EN PROPIEDADES VECINAS .....	24
4.6.	RESCISIÓN DEL CONTRATO .....	24
4.7.	FORMALIZACIONES DEL CONTRATO .....	24
5.	CONDICIONES DE ÍNDOLE TÉCNICA .....	25
5.1.	DISPOSICIONES DE CARÁCTER POPULAR .....	25
5.2.	MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN. ....	25
5.3.	MATERIALES PARA LA FABRICACIÓN DE EQUIPOS .....	25
5.4.	EQUIPOS Y MAQUINARIAS .....	29
5.5.	CONDICIONES DE EJECUCIÓN .....	29

## 1. CONDICIONES GENERALES

### 1.1. OBJETIVO DEL PLIEGO DE CONDICIONES

El Pliego de Condiciones tiene como objetivo marcar las condiciones económicas, administrativas, técnicas, facultativas y legales que se han de regentar para el funcionamiento de una planta de producción de cumeno de 500.000 toneladas anuales de manera que pueda materializarse en las condiciones determinadas, obviando posibles conclusiones distintas de las que se desean.

El contratante tiene la obligación de ejecutar el proyecto según se especifica en el pliego de condiciones. De la misma forma, la administración podrá saber de forma minuciosa las distintas tareas que se realizarán durante la realización del proyecto.

### 1.2. DOCUMENTO DEL PROYECTO QUE DEFINEN LAS OBRAS

Los documentos del TFG que marcan las obras y que la propiedad pone en mano al contratante pueden tener naturaleza contractual o sólo informativo. Se interpreta como documento contractual aquel que esté integrado al contrato y que su cumplimiento sea obligado, excepto modificaciones que sean debidamente permitidas.

Este Trabajo Fin de Grado presenta los siguientes documentos:

- Memoria Descriptiva
- Anexos
- Planos
- Pliego de Condiciones
- Presupuesto
- Estudio de Seguridad e Higiene
- Estudio del Impacto Ambiental

Los documentos contractuales son el Pliego de condiciones, los Planos y el Presupuesto. Los Anexos y la memoria descriptiva solo tienen carácter informativo.

Lo mostrado en el presente Pliego de Condiciones predominará sobre las restricciones que puedan tener relación con él en los documentos que constituyen el Proyecto de Obra. Las omisiones en el Pliego de Condiciones, o las especificaciones erróneas de los detalles de la obra, que sean imprescindibles para la clausura de los trabajos según la Normativa Vigente o el buen uso y costumbre, no sólo excluye al contratador de la obligación de llevarlos a cabo, sino que por el contrario tiene que desarrollarlos como si hubiesen llegado a ser precisa y completamente precisado en dichos documentos.

### **1.3. NORMATIVA DE APLICACIÓN**

- Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de prevención de Riesgos Laborales.
- Real Decreto 1627/1997 de 24 de octubre, por el que se establecen disposiciones mínimas de seguridad y de salud en las obras de construcción.
- Normas que se establecen al diseño de equipos y construcción de la planta:
  - 1- Normativa ASME.
  - 2- Normativa TEMA.
- Real Decreto 2060/2008, de 12 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento de equipos a presión y sus instrucciones técnicas complementarias. Normativa que concierne a procesos de administración.
- Normativa que afectan a los equipos y unidades que se encuentran dentro del Proyecto:
  - 1- Normativa UNE.
  - 2- Normativa ISO.

## 2. CONDICIONES DE ÍNDOLE FACULTATIVA

### 2.1. DISPOSICIONES GENERALES

Se determinan las siguientes disposiciones generales:

- Real Decreto 1098/2001, de 12 de octubre, por el que se aprueba el Reglamento general de la Ley de Contratos de las Administraciones Públicas
- Real Decreto 2720/1998, de 18 de diciembre, por el que se desarrolla el artículo 15 del Estatuto de los Trabajadores en materia de contratos de duración determinada.
- Orden de 9 de marzo de 1971 por la que se aprueba la Ordenanza General de Seguridad e Higiene en el Trabajo.

### 2.2. TÉRMINOS DE PLIEGO DE CONDICIONES

El significado de los términos que se desarrollan en este Pliego es el que a continuación se muestra:

#### **PROPIEDAD**

Los derechos del presente proyecto corresponden a CEPSA-Refinería Campo de Gibraltar. Está pensado para que se localice dentro de la refinería de la misma empresa.

#### **DIRECCIÓN DE OBRA**

La constituye el Titulado Superior y Titulado Medio que elige la propiedad. Tiene el objetivo de personalizar a la Propiedad, luchar por sus intereses y marcar las relaciones contractuales con el contratador adjudicatario de la obra del Proyecto. Se ocupa de que la obra sea una reproducción fiable de lo que se proyecta y estipula en este Pliego, así como con su participación se asegura la supervisión de materiales, el estado de equipos, el funcionamiento ideal y el apoyo técnico al contratador.

## **CONTRATADOR**

Entidad fiscal que contrata con la Propiedad la actuación material de a obra en su totalidad o parte de ella. Cuando el Pliego hace referencia al contratador, se refiere al contratador general de la obra y no a aquellas subcontratas que este contratador haya realizado. No podrá usar la documentación del proyecto para otro objetivo que no sea el desarrollo del mismo.

### **2.3. DIRECCIÓN FACULTATIVA**

La dirección facultativa de las obras e instalaciones será misión del ingeniero técnico o superior nombrado por la propiedad en su imagen, sobre el cual recaerán labores de dirección, control y vigilancia de las obras del proyecto presente.

Las funciones que tiene el ingeniero Director de la obra se muestran a continuación:

- Garantizar la elaboración de las obras con inflexible atadura al proyecto aprobado, o cambios debidamente permitidos.
- Determinar las condiciones técnicas que en este Pliego se dejen a su elección.
- Solventar aquellas condiciones que se desarrollen en relación a la interpretación de los planos, condiciones de materiales y de elaboración de unidades de obra, siempre que no haya cambios en las condiciones del contrato.
- Analizar los problemas que se plantean en las obras que imposibiliten que se cumpla el contrato o asesore su cambio, tramitando las propuestas que correspondan.
- Plantear las actuaciones oportunas para obtener, de las instituciones oficiales y particulares, los pertinentes permisos necesarios para la elaboración de las obras y ocupaciones de los bienes afectados por las mismas, y solventar los problemas que surgen por los servicios relacionados con la misma.
- Admitir personalmente bajo sus competencias, en caso de gravedad o urgencia, dirigir inmediatamente operaciones o trabajos en curso, por lo cual, el contratador pondrá a su disposición relacionados con la misma.
- Justificar al contratista las obras que se llevan a cabo en relación a lo especificado en los documentos del contrato.

- Colaborar tanto en las recepciones provisionales como en las definitivas y elaborar la liquidación de las obras en relación a la normativa vigente.

## 2.4. CONTRATADOR

El contratador se encargará de escoger un jefe de obras como su representación, el cual estará autorizado para velar por los trabajos. Cualquier permuta que el contratador quiera llevar a cabo en relación a sus representaciones y personal cualificado, y más concretamente, del jefe de obras, deberá hacérselo saber a la dirección facultativa.

El contratador se encontrará en la obra durante toda la jornada legal de trabajo y deberá acompañar a la dirección facultativa en la inspección que haga a la obra. Además, deberá asistir a las reuniones de la obra que se lleven a cabo, no pudiéndose justificar por motivo de ausencia ningún tipo de demanda a las órdenes cruzadas por la dirección facultativa.

Se le dará al contratador, tres copias, sin gastos para el contratador, de cada uno de los planos que son necesarios para la elaboración del trabajo. En caso de que este necesitase más copias el coste de estas correrá a cargo del contratador.

El contratador deberá estar al tanto de las disposiciones laborales que pueden llegar a ser de aplicación en la ejecución del trabajo y llevarlas a cabo. Así mismo, proveerá una cantidad necesaria de operarios y personal supervisor y administrativo a fin de cumplir con el programa de construcción.

El contratador debe llevar a cabo las pautas del libro de órdenes, en el que vienen todos los cambios y órdenes que se dictan en cada momento.

La Propiedad comunicará al contratador la normativa que influya a visitas, accesos, entrada de vehículos en la obra, pases especiales y lugares prohibidos de la línea de proceso.

Será a cargo del contratador los gastos que siguen:

- Gastos de construcción y retiro de todo tipo de construcciones auxiliares.
- Gastos de protección de almacenamiento cumpliendo con los requerimientos actuales para dotar seguridad en el interior de las obras.
- Gastos de limpieza y retirada de basuras.

- Gastos de obtención, colocación y mantenimiento de señales de tráfico, balizamiento y el resto de recursos que se necesitan para dotar de seguridad en el interior de las obras.
- Gastos de ensamblaje, conservación y separación de instalaciones para abastecimiento de agua y electricidad que se necesitan para las obras.
- Gastos de derribo y desmontaje de instalaciones provisionales.
- Gastos de retiro de materiales rechazados y enmienda de los errores observados y declarados por los pertinentes ensayos y pruebas.

## **2.5. OBRAS Y EJECUCIÓN**

### **2.5.1. FACULTADES EN LA DIRECCIÓN DE LA OBRA**

Sólo la Dirección de la Obra está habilitada para el análisis del Proyecto y para la exposición de órdenes que simplifiquen la elaboración del mismo.

La Dirección de Obra tendrá la competencia de ordenar, a priori de ejecutarse las obras, los cambios de detalle del Proyecto que estipule siempre que no cambie las líneas generales del mismo, no sobrepase la garantía técnica y sean razonables asesoradas por eventualidades que se dan durante la realización de los trabajos o por mejoras que crea que debe introducir.

Todas las modificaciones técnicas o en el presupuesto derivados de estos posibles cambios serán aprobadas con el contratador. Cualquier cambio del Proyecto propuesto por el contratador debe ser anteriormente aprobado por la Dirección de Obra, que analizará antes de su aceptación, aprobando primero la resolución adoptada.

### **2.5.2. LIBRO DE ÓRDENES**

Es el lugar donde se ven reflejadas todas las visitas que se llevan a cabo por la Dirección de la obra, los problemas que se producen y en general todos y cada uno de los datos que se puedan utilizar para determinar con certeza si el contratador ha cumplido con los plazos establecidos para la ejecución del Proyecto. Las anotaciones en el libro de órdenes darán certeza a efectos de decidir causas ocasionales de resolución y demás incidencias del contrato.



### 2.5.3. INICIO DEL TRABAJO

De debido cumplimiento y de forma escrita, el contratista tendrá la obligación de hacer saber al Ingeniero Director del inicio de los trabajos, un día antes de su comienzo.

El adjudicatario empezará las obras dentro del plazo de 15 días a partir de la fecha de adjudicación. Hará saber al Ingeniero Director del día en que se propone el comienzo de los trabajos, debiendo este dar acuse y recibo.

### 2.5.4. REPLANTEO

El director de las obras, podrá incluir en el Proyecto, a priori de comenzar las obras o durante su realización, los cambios que sean necesarios para la construcción habitual de las mismas, aunque no se hayan tenido en cuenta anteriormente en el proyecto.

Todos estos cambios serán de carácter obligatorio para el contratador siempre que no hagan cambios en el presupuesto de adjudicación en más de los porcentajes citados en la Ley de Contratos del Estado y su reglamento de aplicación actual. En este caso, el contratador no tendrá ningún derecho a ningún cambio en los precios, ni a las compensaciones de ningún tipo por supuesto problemas que le puedan causar los cambios en la cantidad de unidades de obra en el plazo de realización.

### 2.5.5. EJECUCIÓN DE LAS OBRAS

El contratador comenzará las obras dentro de los próximos siete días a la determinación del contrato, a no ser que dicha fecha estuviese expresamente determinada en dicho contrato.

La fecha de inicio así determinada contará a efectos de periodo de realización y de verificación de precios en el supuesto de que dicha verificación se hubiese pactado.

Junto a su propuesta económica, el contratador expondrá un calendario de los trabajos a realizar en el que se estipulará el tiempo que se necesita para realizar la obra en su totalidad y de cada una de sus partes.

El tiempo en el que el contratador se responsabiliza a realizar las obras quedará determinado en el contrato y su incumplimiento se entenderá como una invalidación unilateral y no justificada del mismo.

#### 2.5.6. MAQUINARIA

El contratador estará forzado a colocar en las obras los equipos de la maquinaria que se responsabilice a aportar en la licitación, y que el director de las obras crea necesario para el adecuado funcionamiento de estas. Estos equipos de maquinaria deberán de estar aceptados por el director.

Tanto la maquinaria como el resto de trabajo deberán estar en condiciones idóneas para su actividad y quedar atribuidos a la obra durante el curso de realización de las unidades en las que se deban utilizar.

#### 2.5.7. PUESTA A PUNTO Y PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

Aquellos componentes de la instalación que, por índole y carácter, no tienen exigencia de poner en servicio al conjunto de la instalación se probarán tan rápido como se hayan terminado.

Antes de comprobar la recepción circunstancial, se realizarán a las obras ensayos de resistencia, equilibrio e impermeabilidad. De la misma forma el contratador realizará la puesta a punto de la instalación, comprobándose el adecuado comportamiento de toda las instalaciones y mecanismos de dicha instalación.

#### 2.5.8. MATERIALES

Cada uno de los materiales que sean necesarios de utilizar en las obras serán abastecidos por el contratador de las mismas, salvo que se exponga lo contrario en los planos o en el Pliego de Condiciones del Proyecto. La dirección de Obra se guarda el privilegio de obviar aquellos materiales que vengan de lugares cuyos productos no den garantía a su opinión.

Cada uno de estos materiales se utilizarán con sumo cuidado, y de tal forma que se garantice su calidad y actitud para la obra.

Si la capacidad de la obra, el progreso de la construcción y otros argumentos lo respaldan, el ingeniero puede examinar el material o los artículos manufacturados en sus fuentes.

Con fin de simplificar la examinación y ensayo de los materiales, el contratador hará saber al ingeniero con dos semanas anterior a la entrega como mínimo.

Cada uno de los materiales que no se adapten a los requerimientos del Pliego de Condiciones se considerarán defectuosos y, por tanto, se eliminarán rápidamente del lugar de la obra, a no ser que el ingeniero mande lo contrario. Los materiales obviados, cuyas deficiencias se hayan solucionado sustancialmente, no se utilizarán mientras no se les haya dado su consentimiento.

#### 2.5.9. ENSAYOS

La dirección de obra seleccionará los materiales que deban ser probados antes de ser utilizados y el tipo y normativa de dicha prueba, así la forma en la que deben realizarse y el total de pruebas a realizar.

El contratador tomará las medidas que crea, de las que se hará saber a la dirección de obra para diferenciar los materiales que se aceptan o se rechazan durante las pruebas de recepción. Los materiales que se rechazan deberán ser retirado por parte del contratador y cambiados por otros de forma que no se altere el progreso habitual de las obras.

#### 2.5.10. ALMACENAMIENTO

El contratado debe velar convenientemente el almacenamiento de cada uno de los materiales que tenga en la obra, siendo su obligación reponer aquellos sean defectuosos, o no estén en unas condiciones idóneas, debidos a errores de almacenaje, o otras causas que se deban a él. Los problemas que se producen en los materiales por fenómenos atmosféricos serán también de cuenta del contratador, que deberá instalar la actuación requerida y garantizar la seguridad de dichos almacenes.

La dirección de obra podrá exigir al contratador que se realicen pruebas periódicas, sobre todo poco tiempo antes de utilizar los materiales que sean más fáciles de sufrir daños durante el almacenaje.

El hecho de haber realizado las pruebas de recepción estipuladas, no le quita al contratador la obligación de remediar total o parcialmente, los materiales que se hayan dañados durante su almacenamiento.

#### 2.5.11. SEÑALIZACIÓN DE LAS OBRAS

El contratador está obligado a señalar todas y cada una de las obras que estén dentro del contrato, basándose en las órdenes que dicte el director.

#### 2.5.12. PARTIDAS DE ALZADA

Se trata de la unidad de obra cuyo precio es determinado en una cantidad arbitraria que es el producto de una valoración detallada y sistemática, dependiendo de la medición.

Para la elaboración material de las partidas de alza es esencial obtener la validación por parte de la dirección de obra. A tal efecto, a priori de la realización, estará sujeto a su consideración, desglosando el coste de las mismas y si fuese aceptado podrán llevarse a cabo.

#### 2.5.13. RECEPCIÓN PROVISIONAL DE LAS OBRAS

Acabado el tiempo del ensayo de funcionamiento con resultados positivos, se realizará la recepción provisional de la forma que marca la legislación que está en vigencia.

#### 2.5.14. PERIODO DE GARANTÍAS

El contratador garantiza todas y cada una de las obras que se lleven a cabo, así como cada uno de los elementos y materiales utilizados en ellas. El vencimiento de la garantía será de un año, a no ser que se detalle otro tiempo en el Proyecto.

#### 2.5.15. RECEPCIÓN DEFINITIVA

Dentro del siguiente mes al vencimiento del tiempo de garantía, se realizará la acogida final de las obras.

#### 2.5.16. DOCUMENTO FINAL DE LA OBRA

El contratador otorgará a la dirección de obra tres copias del documento realizado como final de obra. Este documento deberá presentar todas las incidencias presentadas en la obra durante toda su ejecución, así como aquellos cambios que durante el paso de la misma hayan tenido lugar.

### 3. CONDICIONES DE ÍNDOLE ECONÓMICA

#### 3.1. PRINCIPIO GENERAL

Todos los que están involucrados en la realización de la construcción tienen razón a percibir de forma puntual las cantidades adquiridas para su adecuada actuación con compromiso a las condiciones estipuladas en el contrato.

La propiedad, el contratador y los técnicos pueden reclamarse entre sí las garantías adecuadas conformes al cumplimiento de las cuotas establecidas.

#### 3.2. FIANZAS

El contratador dará garantía con arreglo a alguno de los siguientes métodos, según se determine:

- Depósito previo o aval bancario, por importe entre el 4% y el 10% del importe total de lo contratado.
- Mediante retención en los pagos a cuenta en igual proporción.

##### 3.2.1. EJECUCIÓN DE TRABAJOS CON CARGO A LA FIANZA

Si el contratador se niega a hacer por cuenta propia los trabajos estipulados para ultimar la obra en las especificaciones contratadas, el director de obra, en representación de la entidad propietaria, los mandará a realizar a un tercero, o, podrá desarrollarlos directamente por la entidad administrativa, sufragando su importe, sin perjuicio de las acciones a las que tenga derecho la entidad propietaria, en el caso de que la cantidad de la fianza no fuese suficiente para costear el importe de los gastos acaecidos en las unidades de la obra que no fuesen de recibo.

### 3.2.2. DEVOLUCIÓN DE FIANZAS

La fianza se devolverá al contratador en un plazo que no supere los 30 días una vez se haya firmado el acta de recepción definitiva de la obra. La entidad propietaria podrá reclamar que el contratador acredite la liquidación de las deudas causadas por la realización de las obras, tales como subcontratos, salarios, etc.

### 3.2.3. DEVOLUCIÓN DE FIANZA EN EL CASO DE EFECTUARSE RECEPCIONES PARCIALES

Si la entidad propietaria, con la aprobación del director de la obra, aceptara a realizar recepciones parciales, tendrá el derecho el contratador a que se le reembolse la parte proporcional de la fianza.

## 3.3. PRECIOS

### 3.3.1. COMPOSICIÓN DE PRECIOS UNITARIOS

El cálculo de los precios de cada una de las unidades de obra es el producto de adicionar los costes directos, indirectos, beneficio industrial y gastos generales.

#### Costes directos

- Los materiales que queden dentro de la unidad tratada o que se necesiten para su ejecución.
- La mano de obra que intervenga de forma directa en la realización de la unidad de obra.
- Los equipos y sistemas de seguridad e higiene para prevenir y proteger los accidentes y enfermedades dentro del ámbito profesional.
- Los gastos de personal, energía, combustible, etc., que se den por el accionamiento o funcionamiento de la maquinaria utilizada en la ejecución de la obra.
- Los gastos de amortización y mantenimiento de instalaciones, maquinarias, sistemas y equipos citados con anterioridad.

### **Costes indirectos**

- Gastos de montaje de oficinas a pie de obra, comunicaciones, talleres, edificación de almacenes, pabellones para obreros, seguros, laboratorios, etc.
- Los de personal administrativo y técnico atribuidos exclusivamente a la obra y aquellos imprevistos. Todos y cada uno de estos gastos, s cifrarán en un porcentaje de los costes directos.

### **Gastos generales**

Los gastos generales de empresa, tasas de administración, gastos financieros, cargas fiscales, legalmente instaurados. Se cifrarán como un porcentaje de la adición de los costes directos y los costes indirectos.

### **Beneficio industrial**

El beneficio industrial del contratador se fija en el 6% sobre la suma de las partidas anteriores en obras para la administración.

### **Precio de ejecución material**

Esto se denomina al resultado que se obtiene de la suma de los anteriores conceptos exceptuando el beneficio industrial.

### **Precio de contrata**

Se trata de la suma de costes directos, costes indirectos, beneficio industrial y de los gastos generales. El IVA gira sobre esta suma pero no está dentro del precio.



### 3.3.2. PRECIOS DE CONTRATA. IMPORTE DE CONTRATA

El precio de contrata es aquel que conlleva el coste total de la obra, es decir, el precio de ejecución material, además del porcentaje sobre este precio en concepto de beneficio industrial del contratador. El beneficio se aprecia normalmente, en 6 %, a no ser que en las condiciones específicas se establezca otro beneficio distinto.

### 3.3.3. PRECIOS DE CONTRADICTORIOS

Se producen precios contradictorios sólo cuando la entidad propietaria, por mediación del director de obra, tome la decisión de introducir unidades o cambios de calidad en algunas de las que se prevén, o cuando sea necesario enfrentar cualquier coyuntura imprevista. El contratador está obligado a llevar a cabo dichos cambios.

Al no haber acuerdo, el precio se resolverá entre el contratador y el director de obra antes de iniciar la elaboración de los trabajos y en el tiempo que se determine en el pliego de condiciones.

### 3.3.4. RECLAMACIONES DE AUMENTO DE PRECIOS POR DIVERSAS CAUSAS

Si el contratador, a priori de la firma del contrato, no hubiera realizado la observación o reclamación oportuna, no tendrá la posibilidad bajo ningún concepto de error reclamar subida de los precios fijados en el marco correspondiente del presupuesto que sirva de base para la realización de las obras.

### 3.3.5. REVISIÓN DE LOS PRECIOS CONTRATADOS

Para efectuar la comprobación de precios se usan los últimos índices oficiales de comprobación de precios que se hayan aceptado por la Comisión Delegada de Asuntos Económicos y que se hayan publicado en el BOE.

### **3.3.6. ELEMENTOS COMPRENDIDOS EN EL PRESUPUESTO**

Al establecer los precios de cada una de las unidades de obra en el presupuesto, se tiene en cuenta el precio de vallas, elevación, andamios, es decir, todos y cada uno de los elementos auxiliares necesarios para la construcción, así como todo tipo de impuestos, indemnizaciones, multas o pagos que se tengan que realizar por cualquier motivo, con los que se graven los materiales o las obras por Municipio, Provincia o Estado. Es por ello que el contratador no percibirá prima alguna por dichos conceptos.

En el precio de cada unidad de obra también van incluidos los materiales y operaciones oportunas para dejar la obra acabada y en disposición de recibirse.

## **3.4. VALORACIÓN Y ABONO DE LOS TRABAJOS**

### **3.4.1. FORMAS DE ABONO DE LAS OBRAS**

Dependiendo de la modalidad seleccionada para el contrato de las obras y a no ser que, en el Pliego de Condiciones Económicas, se dicte otra cosa, el pago de los trabajos se realizará de la forma que sigue:

Tipo fijo o tanto alzado total. Se pagará la cifra que anteriormente se ha establecido como base de la adjudicación, disminuida en su caso en el pago de baja realizada por el beneficiario.

- Tipo fijo o tanto alzado por unidad de obra, cuyo importe fijo se haya establecido con anterioridad, teniendo la posibilidad de variar solo el número de unidades ejecutadas.
- Anterior medición y estableciendo al total de las numerosas unidades de obra realizadas, de la cantidad fija establecida con anterioridad para cada una de ellas, se pagará al contratador la cantidad de las establecidas en los trabajos realizados

y ultimados con arreglo y sujeción de los documentos que forman el proyecto, los que se utilizarán de apoyo para la medición y la valoración de las distintas unidades.

- Tanto variable por unidad de obra, según los requisitos en que se ejecute y los materiales permitidos en la forma en que el Pliego General de Condiciones Económicas establece. Se pagará al contratador en las mismas condiciones que en el caso previo.
- Por la relación de retribución y recibos de materiales, permitidos en el formato que el Pliego General de Condiciones Económicas establece.
- Por horas de trabajo, realizado en las condiciones que determina el contrato.

#### 3.4.2. RELACIONES VALORADAS Y CERTIFICACIONES

En cada una de las fechas que se dicten en el contrato o en los pliegos de condiciones específicos que dirijan en la obra, conformará el contratador una lista de las obras realizadas durante los tiempos pronosticados, según la medida que habrá dictado el aparejador.

### 3.5. INDEMNIZACIONES MÚTUAS

#### 3.5.1. IMPORTE DE LA INDEMNIZACIÓN POR RETRASO NO JUSTIFICADO

La indemnización por demora en el fin se fijará en un tanto por mil del pago total de los trabajos que se contratan, por cada día natural de demora, contados a partir del día de fin establecido en el anuario de obra. Las sumas resultantes se quitarán y paralizarán con concepto a la fianza.

#### 3.5.2. DEMORA DE LOS PAGOS

Si el propietario no realizase el importe de las obras realizadas, dentro del siguiente mes al que se ajusta el plazo establecido, el contratador además podrá recibir el importe de un 5 % al año, como interés de retraso, durante el periodo de demora y sobre el pago de la certificación citada.

Si aun habiendo pasado dos meses del fin del plazo de un mes sin haberse realizado dicho importe, el contratador tendrá razón al dictamen del contrato, procediéndose a la supresión que corresponda de las obras realizadas y de los materiales almacenados, siempre que estos presenten las condiciones anteriormente establecidas y que su cantidad no sobre pase de la necesaria para el fin de la obra contratada.

Sin embargo, lo manifestado con anterioridad, se negará toda solicitud del contrato basada en dicho retraso de pagos, cuando el contratador no demuestre que en el momento de la solicitud citada ha invertido en materiales o en obra.

## 4. CONDICIONES DE ÍNDOLE LEGAL

### 4.1. DISPOSICIONES LEGALES

Se disponen de las siguiente:

- Orden de 9 de marzo de 1971 por la que se aprueba la Ordenanza General de Seguridad e Higiene en el Trabajo derogado parcialmente desde 27 de agosto de 1997 por Real decreto 1215/1997, de 18 de julio, por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud para la utilización por los trabajadores de los equipos de trabajo.
- Real Decreto 1627/1997, de 24 de octubre, por el que se establecen disposiciones mínimas de seguridad y de salud en las obras de construcción.
- Real Decreto 39/1997, de 17 de enero, por el que se aprueba el Reglamento de los Servicios de Prevención.
- Real Decreto 843/2011, de 17 de junio, por el que se establecen los criterios básicos sobre la organización de recursos para desarrollar la actividad sanitaria de los servicios de prevención.
- Corrección de errores del Real Decreto 555/1986, de 21 de febrero, por el que se implanta la obligatoriedad de la inclusión de un estudio de seguridad e higiene en el trabajo en los proyectos de edificación y obras públicas.
- Las normas que estén en vigor en el momento.

También deben cumplirse lo que la dirección de obra dicte para asegurar la seguridad de los trabajadores y de la obra en general.

### 4.2. CONTRATISTA

#### 4.2.1. OBLIGACIONES DEL CONTRATADOR

El contratador tiene la obligación de realizar todas y cada una de las obras que se le confían, además de llevar a cabo todas las condiciones citadas en el pliego de Condiciones o en el mismo contrato, al igual que las órdenes que se le asignen ya se de forma escrita o verbal por el Técnico Director de las obras.

#### 4.2.2. RESPONSABILIDAD DEL CONTRATADOR

El contratador será el único responsable de asegurar la calidad y la buena realización de las obras contratadas, no pudiendo reclamar ninguna indemnización por el precio que pudiesen costarle, ni por las maniobras fallidas que se diesen durante la construcción, siendo de su responsabilidad indistintamente de la inspección que haya podido realizar el director de la obra.

El contratador debe acoger todas y cada una de las medidas necesarias de seguridad que las normativas vigentes marquen, para asegurar la seguridad de los obreros o viandantes, en todos los lugares peligrosos de la obra.

También, el contratador es responsable de los accidentes que se dieran en las obras por descuido o inexperiencia, debiendo acatarse a las normas de cautela, así como a las disposiciones de las autoridades de la materia.

#### 4.3. LEYES LABORALES DE ACCIDENTES DE TRABAJO.

El contratador estará obligado a cumplir de forma exhaustiva todas las legislaciones que estén en vigor, o que puedan establecerse en el desarrollo de los trabajos.

De la misma forma estará forzado a tener asegurado a todo el personal que esté a sus órdenes contra accidentes laborales, debiendo ser probado por la Propiedad o por la Dirección Técnica.

#### 4.4. MANO DE OBRA

El contratador tendrá la obligación de asegurar siempre que haya un número de trabajadores que sea proporcional a la extensión y tipo de los trabajos que se desarrollen a juicio de la Dirección Técnica. Estos tendrán la capacidad apropiada en su oficio y siempre habrá en obra una persona para vigilar y que sea capaz de leer e interpretar los planos.

#### 4.5. DAÑOS EN PROPIEDADES VECINAS

Si a causa de las obras el contratador causara algún daño en las propiedades vecinas, estará a su cargo la reparación. Además, realizará todas las medidas que estipule necesarias para impedir los accidentes a causa de caída de herramientas o materiales.

#### 4.6. RESCISIÓN DEL CONTRATO

La abolición, si se diese, se regirá por el Reglamento General de Contratación para Aplicación de Ley de Contratos de Estado, por el Pliego de Cláusulas Administrativas Generales y las diferentes leyes y mandatos que se encuentren en vigor.

Las causas de abolición del contrato son las siguientes:

- Quiebra del Contratador
- Fallecimiento o incapacitación del contratador
- Perturbación del contrato por las causas que siguen:
  - Cambio del proyecto de tal forma que muestren perturbaciones fundamentales según dicte el director de la obra, y siempre que el cambio en el presupuesto sea del 25 % como mínimo de su coste.
  - Cambios en las variaciones de obra en 40%.
  - Anulación de la obra ya empezada.
  - Violación de las condiciones marcadas en el contrato, cuando perjudique a los intereses de las obras.
  - Desatención de la obra sin una causa justificada.

#### 4.7. FORMALIZACIONES DEL CONTRATO

La formalización del contrato se realizará por un documento de carácter privado con el compromiso tanto de la propiedad como del contratador de llevarlo a documento público si cualquiera de ellos lo solicitase, como complemento del contrato, planos, pliegos y el resto de documentos del proyecto irán firmadas por ambas entidades.

## 5. CONDICIONES DE ÍNDOLE TÉCNICA

Las condiciones técnicas particulares son las que describen cada uno de los materiales, obras y equipos que van a llevarse a cabo dentro del proyecto, además de la forma en la que se desarrollen las mismas.

Además, se mostrarán en ellas las obligaciones de carácter técnico que correspondan al Director Técnico y al contratador.

### 5.1. DISPOSICIONES DE CARÁCTER POPULAR

- Normativa de la Asociación Española de Normalización (AENOR).
- Normativa de tecnologías de edificación.
- Reales Decreto vigentes en el Estado Español.

### 5.2. MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN.

Cada uno de los materiales que se empleen en la construcción, deben estar respaldados por el catálogo de Normas UNE de 1992.

Para los materiales que no se encuentren especificados dentro de dicho catálogo se seguirán las recomendaciones de la dirección técnica.

Además, dichos materiales podrán ser sometidos a ensayos que se vean necesarios para verificar su buena calidad. Por lo que, cualquier material que a juicio de la dirección técnica no incorpore las condiciones necesarias será rechazado.

### 5.3. MATERIALES PARA LA FABRICACIÓN DE EQUIPOS

El material que se ha utilizado para la construcción de los equipos de reacción es el acero inoxidable AISI 316L.



Las diferentes normas por las que se rigen los materiales para fabricar los equipos y ensayos de este material son:

- UNE 14618:2000. Inspectores de soldadura. Cualificación y certificación.
- UNE 36525:2001 Productos de acero. Perfil U comercial. Medidas.
- UNE 36526:1994 Productos de acero laminados en caliente. Perfiles IPE. Medidas.
- UNE 48103:2002 Pinturas y barnices. Colores normalizados.
- UNE 7475-1:1992 Materiales metálicos. Ensayo de flexión por choque sobre probeta Charpy. Parte 1: método de ensayo.
- UNE-EN ISO 10666:2000 Tornillos autotaladrantes y autorroscantes. Características mecánicas y funcionales (ISO 10666:1999).
- UNE-EN ISO 10684:2006 Elementos de fijación. Recubrimientos por galvanización en caliente (ISO 10684:2004)
- UNE-EN ISO 10684:2006/AC:2009 Elementos de fijación. Recubrimientos por galvanización en caliente (ISO 10684:2004/Cor 1:2008)
- UNE-EN ISO 12944-1:1999 Pinturas y barnices. Protección de estructuras de acero frente a la corrosión mediante sistemas de pintura protectores. Parte 1: Introducción general. (ISO 12944-1:1998).
- UNE-EN ISO 12944-2:1999 Pinturas y barnices. Protección de estructuras de acero frente a la corrosión mediante sistemas de pintura protectores. Parte 2: Clasificación de ambientes. (ISO 12944-2:1998).
- UNE-EN ISO 12944-3:1999 Pinturas y barnices. Protección de estructuras de acero frente a la corrosión mediante sistemas de pintura protectores. Parte 3: Consideraciones sobre el diseño. (ISO 12944-3:1998).
- UNE-EN ISO 12944-4:1999 Pinturas y barnices. Protección de estructuras de acero frente a la corrosión mediante sistemas de pintura protectores. Parte 4: Tipos y preparación de superficies. (ISO 12944-4:1998).
- UNE-EN ISO 12944-5:2008 Pinturas y barnices. Protección de estructuras de acero frente a la corrosión mediante sistemas de pintura protectores. Parte 5: Sistemas de pintura protectores. (ISO 12944-5:2007).
- UNE-EN ISO 12944-6:1999 Pinturas y barnices. Protección de estructuras de acero frente a la corrosión mediante sistemas de pintura protectores. Parte 6: Ensayos de comportamiento en laboratorio. (ISO 12944-6:1998).

- UNE-EN ISO 12944-7:1999 Pinturas y barnices. Protección de estructuras de acero frente a la corrosión mediante sistemas de pintura protectores. Parte 7: Ejecución y supervisión de trabajos de pintado. (ISO 12944-7:1998).
- UNE-EN ISO 12944-8:1999 Pinturas y barnices. Protección de estructuras de acero frente a la corrosión mediante sistemas de pintura protectores. Parte 8: Desarrollo de especificaciones para trabajos nuevos y mantenimiento. (ISO 12944-8:1998).
- UNE-EN ISO 13920:1997 Soldeo. Tolerancias generales en construcciones soldadas. Dimensiones de longitudes y ángulos. Forma y posición. (ISO 13920:1996).
- UNE-EN ISO 14001:2004 Sistemas de gestión ambiental. Requisitos con orientación para su uso. (ISO 14001:2004).
- UNE-EN ISO 14713-1:2011 Directrices y recomendaciones para la protección frente a la corrosión de las estructuras de hierro y acero. Recubrimientos de cinc. Parte 1: Principios generales de diseño y resistencia a la corrosión. (ISO 14713-1:2009).
- UNE-EN ISO 14713-2:2011 Directrices y recomendaciones para la protección frente a la corrosión de las estructuras de hierro y acero. Recubrimientos de cinc. Parte 2: Galvanización en caliente. (ISO 14713-2:2009).
- UNE-EN ISO 14713-3:2011 Directrices y recomendaciones para la protección frente a la corrosión de las estructuras de hierro y acero. Recubrimientos de cinc. Parte 3: Sherardización. (ISO 14713-3:2009).
- UNE-EN ISO 14713:2000 Protección frente a la corrosión de las estructuras de hierro y acero. Recubrimientos de cinc y aluminio. Directrices. (ISO 14713:1999).
- UNE-EN ISO 15607:2004 Especificación y cualificación de los procedimientos de soldeo para los materiales metálicos. Reglas generales (ISO 15607:2003).
- UNE-EN ISO 15609-1:2005 Especificación y cualificación de los procedimientos de soldeo para los materiales metálicos. Especificación del procedimiento de soldeo. Parte 1: Soldero por arco. (ISO 15609-1:2004).
- UNE-EN ISO 15613:2005 Especificación y cualificación de procedimientos de soldeo para materiales metálicos. Cualificación mediante ensayos de soldeo anteriores a la producción (ISO 15613:2004).

- UNE-EN 15048-1:2008 Uniones atornilladas estructurales sin precarga. Parte 1: Requisitos generales.
- UNE-EN 15048-2:2008 Uniones atornilladas estructurales sin precarga. Parte 2: Ensayo de aptitud.
- UNE-EN ISO 1716:2011 Ensayos de reacción al fuego de productos. Determinación del calor bruto de combustión (valor calorífico). (ISO 1716:2010).
- UNE-EN ISO 17635:2010 Ensayo no destructivo de uniones soldadas. Reglas generales para los materiales metálicos. (ISO 17635:2010).
- UNE-EN ISO 17640:2011 Ensayo no destructivo de uniones soldadas. Ensayo por ultrasonidos. Técnicas, niveles de ensayo y evaluación. (ISO 17640:2010).
- UNE-EN ISO 2063:2005 Proyección térmica. Recubrimientos metálicos y otros recubrimientos inorgánicos. Cinc, aluminio y sus aleaciones (ISO 2063:2005).
- UNE-EN ISO 23277:2010 Ensayo no destructivo de uniones soldadas. Ensayo de uniones soldadas mediante líquidos penetrantes. Niveles de aceptación. (ISO 23277:2006).
- UNE-EN ISO 2409:2007 Pinturas y barnices. Ensayo de corte por enrejado. (ISO 2409:2007).
- UNE-EN ISO 286-2:2011 Especificación geométrica de productos (GPS). Sistema de codificación ISO para las tolerancias en dimensiones lineales. Parte 2: Tablas de las clases de tolerancia normalizadas y de las desviaciones límite para agujeros y ejes. (ISO 286-2:2010).
- UNE-EN ISO 3834-1:2006 Requisitos de calidad para el soldeo por fusión de materiales metálicos. Parte 1: Criterios para la selección del nivel apropiado de los requisitos de calidad. (ISO 3834-1:2005).
- UNE-EN ISO 3834-2:2006 Requisitos de calidad para el soldeo por fusión de materiales metálicos. Parte 2: Requisitos de calidad completos (ISO 3834-2:2005).
- UNE-EN ISO 3834-3:2006 Requisitos de calidad para el soldeo por fusión de materiales metálicos. Parte 3: Requisitos de calidad normales. (ISO 3834-3:2005).
- UNE-EN ISO 3834-4:2006 Requisitos de calidad para el soldeo por fusión de materiales metálicos. Parte 4: Requisitos de calidad elementales. (ISO 3834-4:2005).

- UNE-EN ISO 3834-5:2006 Requisitos de calidad para el soldeo por fusión de materiales metálicos. Parte 5: Documentos exigibles para cumplir los requisitos de calidad de las Normas ISO 3834-2, ISO 3834-3 o ISO 3834-4. (ISO 3834-5:2005).
- UNE-EN 12517-1:2006 Ensayo no destructivo de uniones soldadas. Parte 1: Ensayo radiográfico de uniones soldadas en acero, níquel, titanio y sus aleaciones. Niveles de aceptación.
- UNE-EN 12517-2:2010 Ensayo no destructivo de uniones soldadas. Parte 2: Ensayo radiográfico de uniones soldadas en aluminio y aleaciones de aluminio. Niveles de aceptación.
- UNE-EN 1289/1M:2002 Ensayo no destructivo de uniones soldadas. Ensayo mediante líquidos penetrantes de uniones soldadas. Niveles de aceptación.
- UNE-EN 1289:1998 Examen no destructivo de soldaduras. Ensayo de soldaduras por líquidos penetrantes. Niveles de aceptación.
- UNE-EN 1289:1998/A2:2006 Ensayo no destructivo de uniones soldadas. Ensayo mediante líquidos penetrantes de uniones soldadas. Niveles de aceptación.
- UNE-EN 1290/1M:2002 Ensayo no destructivo de uniones soldadas. Ensayo de uniones soldadas mediante partículas magnéticas.
- UNE-EN 1290:1998 Examen no destructivo de uniones soldadas. Examen de uniones soldadas mediante partículas magnéticas.
- UNE-EN 1290:1998/A2:2006 Ensayo no destructivo de uniones soldadas. Ensayo de uniones soldadas mediante partículas magnéticas.

#### 5.4. EQUIPOS Y MAQUINARIAS

La normativa de obligado cumplimiento a la que están sujetos toda la maquinaria y equipos también están dentro del catálogo de Normas UNE de 1992.

#### 5.5. CONDICIONES DE EJECUCIÓN

Las condiciones de realización, condiciones de índole funcional de materiales y equipos industriales, control de la seguridad en el puesto de trabajo, valoración, ejecución y mantenimiento de los mismos estarán recogidas en las normas NTE y NBE.



# DOCUMENTO 5: PRESUPUESTO.

## Tabla de contenido

<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>3</b>
<b>2. PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL .....</b>	<b>4</b>
<b>3. PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN POR CONTRATA .....</b>	<b>6</b>
<b>4. COSTES GENERALES .....</b>	<b>7</b>
<b>4.1. COSTES DE FABRICACIÓN.....</b>	<b>7</b>
<b>4.1.1. HONORARIOS DE PROYECTO Y DIRECCIÓN DE MONTAJE .....</b>	<b>7</b>
<b>4.1.2. MATERIAS PRIMAS.....</b>	<b>7</b>
<b>4.1.3. SERVICIOS GENERALES.....</b>	<b>8</b>
<b>4.2. GASTOS DE GESTIÓN.....</b>	<b>8</b>

## 1. INTRODUCCIÓN

El presente documento tiene el objetivo de definir el coste económico de la realización del presente TFG, en unidades monetarias, “Diseño de un Proceso de Producción de Cumeno mediante un Reactor de Alquilación y un Reactor de Transalquilación catalíticos”.

Para llevar a cabo dicho presupuesto, es necesario tener en cuenta el coste de inmovilizado, que incluyen: coste de equipos y accesorios de los mismos.

La suma de los costes que anteriormente se han mencionado se denomina como Presupuesto de Ejecución Material (P.E.M.). Si a esto se le añade además el Beneficio Industrial y los Gastos Generales da como resultado el Presupuesto de Ejecución por Contrata (P.E.C.), al cual habría que añadirle el IVA, el cual es un 21% del P.E.C.

Igualmente, se prestará atención a los costes generales necesarios para que la planta esté en funcionamiento. En dichos costes se incluyen los gastos de gestión y fabricación.

En este TFG no se llevará a cabo un estudio de rentabilidad económica total del proceso ya que para ello sería necesario el diseño del proceso en su totalidad y no sólo de la etapa de reacción como se muestra en el alcance del TFG.



## 2. PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL

A continuación, se desglosa el presupuesto. La suma de todos da lugar al Presupuesto de Ejecución Material (P.E.M.).

- **EQUIPOS**

Tabla 5.2.1. Reactor de Alquilación y Reactor de Transalquilación			
Descripción	Unidades	Precio unitario (€)	Precio global (€)
Tubos del Reactor de Alquilación de diámetro de 2,54 cm y 6 m de largo fabricados con acero inoxidable AISI 316L	468	80,45	37650,6
Carcasa del Reactor de Alquilación de 0,7 m de diámetro y 7 m de largo fabricado con acero inoxidable AISI 316L	1	6789,56	6789,56
Tubos del Reactor de Transalquilación de diámetro de 1,02 cm y 1,75 m de largo fabricados con acero inoxidable AISI 316L	204	65,54	13370,16
Carcasa del Reactor de Transalquilación de 0,2 m de diámetro y 2,5 m de largo fabricado con acero inoxidable AISI 316L	1	2546,84	2546,84

- **ACCESORIOS**

Tabla 5.2.2. Accesorios			
Descripción	Unidades	Precio unitario	Precio total (€)
Tornillería	158	0,5	79
Bridas	8	18	144
Sensores de Temperatura (WTR 120)	10	85	850
Sensores de Presión (RS 302 5844)	6	125	750
Sensores de caudal (PCE instruments)	4	240	960
Sensores de nivel (CO 05 016)	2	105	210

A continuación, se muestra la siguiente tabla donde se recopilan los costes globales de los elementos que se han detallado anteriormente. Además, se calcula el Presupuesto de Ejecución Material a partir de la suma de las partidas citadas.

Tabla 5.2.3. Presupuesto de Ejecución Material	
Descripción	Precio total (€)
Equipos	60357,16
Accesorios	2993
<b>P.E.M.</b>	<b>63350,16</b>

El Presupuesto de Ejecución Material del presente TFG “Diseño de un Proceso de Producción de cumeno mediante un Reactor de Alquilación y un Reactor de Transalquilación catalíticos” es de **sesenta y tres mil trescientos cincuenta con dieciséis céntimos**.

### 3. PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN POR CONTRATA

El P.E.C. es el resultado de añadirle al P.E.M. los Gastos Generales y el Beneficio Industrial, a los que les pertenecen un porcentaje del 13% y del 6% del P.E.M. correspondientemente.

Tabla 5.3.1. Presupuesto de Ejecución por Contrata	
	Costes(€)
P.E.M.	63350,16
Beneficios Industriales (6%)	3801,00
Gastos Generales (13%)	8235,52
<b>P.E.C.</b>	<b>75386,68</b>

El P.E.C. del presente Trabajo Fin de Grado “Diseño de un Proceso de Producción de cumeno mediante un Reactor de Alquilación y un Reactor de Transalquilación catalíticos” asciende a **setenta y cinco mil trescientos ochenta y seis euros con sesenta y ocho céntimos**.

El Presupuesto de Ejecución General se trata del Presupuesto de Ejecución por Contrata añadiéndole el IVA:

Tabla 5.3.2. Presupuesto de Ejecución General	
	Costes(€)
P.E.C.	75386,68
IVA (21%)	15831,20
<b>P.E.G.</b>	<b>91217,88</b>

El P.E.G. del presente Trabajo Fin de Grado “Diseño de un Proceso de Producción de cumeno mediante un Reactor de Alquilación y un Reactor de Transalquilación catalíticos” asciende a **noventa y un mil doscientos diecisiete euros con ochenta y ocho céntimos**.

## 4. COSTES GENERALES

Los Costes Generales se calculan sumando los Costes de Gestión y los Costes de Fabricación.

Los Costes de Gestión están referidos a los gastos comerciales en general. Por otro lado, dentro de los Costes de Fabricación se realizará el cálculo que tienen relación con los honorarios de proyecto, materias primas y servicios de carácter general.

### 4.1. COSTES DE FABRICACIÓN

#### 4.1.1. HONORARIOS DE PROYECTO Y DIRECCIÓN DE MONTAJE

Dichos gastos son un 7% del P.E.C.:

Tabla 5.4.1. Presupuesto de Honorarios y Dirección de Montaje	
	Costes(€)
P.E.C.	75386,68
Honorarios del Proyecto	5277,07

#### 4.1.2. MATERIAS PRIMAS

En este apartado solo se tendrán en cuenta los gastos por la compra de catalizador ya que los reactivos que se utilizan, como se cita en la Memoria Descriptiva, provienen de otro proceso dentro de la misma planta.

Tabla 5.4.2. Presupuesto de Materias Primas			
	Cantidad (Kg)	Precio (€/Kg)	Costes(€)
Catalizador zeolítico Reactor de Alquilación	533,32	50	26666
Catalizador zeolítico Reactor de Transalquilación	12,2	50	610

#### 4.1.3. SERVICIOS GENERALES

Los gastos de los servicios generales comprenden el agua utilizada como fluido refrigerante en ambos reactores.

El precio del fluido refrigerante utilizado en ambos reactores para controlar la temperatura en dichos reactores es de 1.4 €/Kg.

Tabla 5.4.3. Presupuesto de Materias Primas			
	Consumo (kg/año)	Coste unitario (€/Kg)	Coste anual (€/año)
Reactor de alquilación	128019395,2	1,4e-03	179227,15
Reactor de Transalquilación	9211363,933	1,4e-03	12895,91

Esto hace que los costes de fabricación asciendan a **224.676,133 €**.

#### 4.2. GASTOS DE GESTIÓN

Estos gastos, como ya se ha citado, incorporan los costes comerciales que suponen un 4% del presupuesto de Costes de Fabricación, esto es:

Tabla 5.4.2. Presupuesto de los Costes de Gestión	
	Costes (€)
Gastos de Fabricación	224676,13
Gastos de Gestión	8987,05

Los Costes Generales, como se ha citado anteriormente corresponde a añadirle los Gastos de Gestión a los Gastos de Fabricación dando como resultado un total de **Doscientos treinta y tres mil seiscientos sesenta y tres euros con dieciocho céntimos**.

# DOCUMENTO 6: ESTUDIO DE SEGURIDAD Y SALUD.

## Tabla de contenido

<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>3</b>
<b>2. RAZÓN DE LA REALIZACIÓN DEL ESTUDIO BÁSICO DE SEGURIDAD Y SALUD. ....</b>	<b>3</b>
<b>3. INSTALACIONES PROVISIONALES Y ASISTENCIA SANITARIA.....</b>	<b>4</b>
<b>4. MAQUINARIA DE LA OBRA .....</b>	<b>5</b>
<b>5. MEDIOS AUXILIARES .....</b>	<b>5</b>
<b>5.1. ESCALERAS DE MANO .....</b>	<b>6</b>
<b>5.2. INSTALACIÓN ELÉCTRICA .....</b>	<b>6</b>
<b>6. RIESGOS LABORALES EVITABLES .....</b>	<b>6</b>
<b>7. RIESGOS LABORALES INEVITABLES.....</b>	<b>6</b>
<b>7.1. EN LA TOTALIDAD DE LA OBRA.....</b>	<b>7</b>
<b>7.2. DURANTE LA FASE DE MONTAJE DE LOS EQUIPOS Y ALBAÑILERÍA .....</b>	<b>8</b>
<b>7.3. DURANTE EL ACABADO .....</b>	<b>9</b>
<b>7.4. DURANTE LA INSTALACIÓN .....</b>	<b>10</b>
<b>8. RIESGOS LABORALES DE CARÁCTER ESPECIAL .....</b>	<b>10</b>
<b>9. PREVISIONES PARA TRABAJOS FUTUROS.....</b>	<b>11</b>
<b>10. NORMATIVA DE SEGURIDAD Y SALUD APLICADA A LA OBRA .....</b>	<b>11</b>
<b>10.1. LEGISLACIÓN GENERAL .....</b>	<b>11</b>
<b>10.2. LEGISLACIÓN PARA INSTALACIONES DE OBRAS Y EQUIPOS. ....</b>	<b>12</b>
<b>10.3. LEGISLACIÓN REFERIDA A LOS EPIs .....</b>	<b>12</b>
<b>10.4. NOTAS TÉCNICAS DE PREVENCIÓN (NPT) DEL INSTITUTO NACIONAL DE SEGURIDAD E HIGIENE.....</b>	<b>13</b>

## **1. INTRODUCCIÓN**

Este Estudio Básico de Seguridad y Salud está descrito para asegurar la ejecución del Real Decreto 1627/1997 del 24 de Octubre (que se publica en el Boletín Oficial del Estado el 25 de Octubre de 1997 cuyo número de boletín oficial es el 256), por el que se instauran reglas mínimas de salud y seguridad en las obras de construcción dentro de la Ley 31/1995 del 8 de Noviembre (publicado en el Boletín Oficial del Estado el 10 de Noviembre de 1995 cuyo número de boletín oficial es el 269), de Prevención de Riesgos Laborales.

Su autor es Alberto Barba Espinar y se ha elaborado con motivo de la ejecución del TFG: “Diseño de un Proceso de Producción de Cumeno mediante un Reactor de Alquilación y un Reactor de Transalquilación catalíticos”.

Tal y como se cita en el artículo 3 del Real Decreto 1627/1997, si en la obra participase más de una empresa o una empresa y trabajadores de forma autónoma o más de un trabajador de forma autónoma, el organizador tendrá que designar una persona que coordine la Seguridad y la Salud durante se llevan a cabo la realización de las obras.

En el presente documento se presenta un análisis básico sobre cada uno de los riesgos que puedan existir en el ámbito de Seguridad e Higiene que presentan las condiciones de trabajo en el caso de que sea posible la realización de las obras del presente Proyecto (aunque no está dentro del alcance de este Trabajo Fin de Grado). El conocimiento de los riesgos principales que existen en el trabajo y el debido desarrollo de las medidas que son esenciales para prevenir los posibles accidentes, mejora las condiciones para llegar a un nivel superior de seguridad y salud de los trabajadores.

## **2. RAZÓN DE LA REALIZACIÓN DEL ESTUDIO BÁSICO DE SEGURIDAD Y SALUD.**

La razón principal de la ejecución del estudio básico de Seguridad y Salud es posibilitar la realización del Plan de Seguridad y Salud en el Trabajo al promotor, ya que éste estará forzado a la ejecución de un estudio de Seguridad y Salud en Proyectos de obras en los que se den alguno de las siguientes suposiciones (Real Decreto 1627/1997 del 24 de Octubre):



- Duración aproximada superior a 30 días laborables, utilizándose en algún momento más de 20 trabajadores a la vez.
- Obras de conducciones bajo tierra, galerías, presas y túneles.
- Presupuesto de realización por contrata dentro del Proyecto igual o mayor a 450.759 €, incluyendo IVA.
- Capacidad de trabajadores estimada, admitiendo por tal la suma de los días de trabajo del total de los trabajadores sea superior a 500.

Si no ocurriesen ninguno de estos sucesos sería recomendable, pero no de carácter de obligado cumplimiento, la elaboración de un estudio básico de Seguridad y Salud.

### **3. INSTALACIONES PROVISIONALES Y ASISTENCIA SANITARIA**

En referencia al décimo quinto apartado del cuarto Anexo del Real Decreto 1627/1997, la obra tendrá incorporada los servicios higiénico-sanitarios que se citan a continuación:

- Lavabos con agua con temperatura ajustable.
- Duchas con temperatura ajustable.
- Vestuarios con taquillas individuales y asientos.
- Retretes.

Dichos servicios se encontrarán dentro de tres habitaciones incorporadas a la obra. El motivo de construir dichos habitáculos es para el confort de los trabajadores de diferente género y su uso paralelo.

También, en sintonía con el apartado A3 del sexto Anexo del Real Decreto 486/1997, la obra acondicionará del material de primeros auxilios que están citados en la tabla siguiente, en la que están incluidas las identidades y alejamientos al foco de asistencia sanitaria más próximos:

<b>Tabla 6.3.1. Primeros Auxilios y Asistencia Sanitaria</b>			
<b><u>Nivel de Asistencia</u></b>	<b><u>Nombre</u></b>	<b><u>Localización</u></b>	<b><u>Distancia estimada en Km</u></b>
Primeros Auxilios	Servicio Propio de Guardia	Obra	0
Asistencia Primaria	Centro de Salud Evaristo Domínguez	San Roque	3,3
Asistencia Especial	Hospital Quirónsalud	Campo de Gibraltar	8,8

## 4. MAQUINARIA DE LA OBRA

La maquinaria que se tiene previsto utilizar en la realización de la obra para la adecuación del local es:

- Camiones.
- Hormigoneras.
- Equipos y maquinaria pequeñas
- Otros.

Los trabajadores que se encuentran al frente de la obra deberán proporcionar los Equipos de Protección Individual (EPIs) que se estimen necesarios para manejar las maquinarias requeridas y basándose en las recomendaciones de seguridad dadas por el fabricante y que se estipulan en el estudio básico de Seguridad y Salud.

## 5. MEDIOS AUXILIARES

Seguidamente se detallan los medios auxiliares que van a ser empleados en la obra y sus principales características:

### **5.1. ESCALERAS DE MANO**

- Distanciamiento de la pared en el apoyo en relación a la longitud final.
- Zapatas antideslizantes. Deben exceder en 1 metro la longitud a salvar.

### **5.2. INSTALACIÓN ELÉCTRICA**

- Diferenciales de 0,4 A en líneas de fuerza y maquinaria.
- Diferenciales de 0,04 A en líneas de alumbrado con tensión superior a 24 V.
- Cuadro general en caja de doble aislamiento, localizado a una altura de 1 m.
- La puesta a tierra será menor de 80  $\Omega$ .
- La instalación de cables irá por vía aérea desde la salida del cuadro general.
- Magnetotérmico general omnipolar con acceso desde el exterior.
- Magnetotérmico en líneas de tomas de corriente, alumbrado y maquinaria.

## **6. RIESGOS LABORALES EVITABLES**

Para prevenir los riesgos laborales de carácter evitables se llevarán medidas técnicas apropiadas. Entre dichos riesgos y sus medidas llevadas a cabo, se incorporan:

- Originario de la fractura de las instalaciones existentes: Se van a anular las instalaciones que no posean un fin determinado.
- Existencia de líneas eléctricas de alta tensión ya sean de carácter aéreo o subterráneo: Se anulará el abastecimiento y se establecerá la conexión a tierra.

## **7. RIESGOS LABORALES INEVITABLES**

Seguidamente se desglosan los riesgos laborales que no se pueden evitar, y la adopción de las medidas preventivas y las protecciones pertinentes para controlar y reducir dicho tipo de riesgos.

### 7.1. EN LA TOTALIDAD DE LA OBRA

Se aprecian los riesgos que a continuación se citan:

- Caídas de operarios en distinto o mismo nivel.
- Fuertes vientos.
- Sobreesfuerzos.
- Caída de objetos sobre trabajadores.
- Contactos con corriente de forma directa o indirecta.
- Choques o golpes contra otros objetos.
- Cuerpos extraños en los ojos.

Para minimizar dichos riesgos se llevarán a cabo las acciones preventivas y protecciones colectivas que seguidamente se citan:

- Iluminación adecuada y suficiente.
- Extintor de polvo seco, de eficacia 21A-113B.
- Cursos de formación a los operarios.
- Limpieza y orden de los lugares de trabajo.
- Puesta a tierra en cuadros, masas y máquinas sin doble aislamiento.
- Distancia de seguridad o recubrimiento a líneas eléctricas.
- Eliminación de escombros.
- No permanecer en el radio de acción de la maquinaria.

Se emplean los equipos de protección individual siguientes:

- Zapatos protectores.
- Gafas o cubre gafas de seguridad.
- Ropa de trabajo.
- Cascos de seguridad.

## 7.2. DURANTE LA FASE DE MONTAJE DE LOS EQUIPOS Y ALBAÑILERÍA

Se contemplarán los riesgos siguientes:

- Lesiones y cortes.
- Electrocuciones.
- Proyecciones de partículas al realizar cortes en el material.
- Caída de trabajadores o materiales.
- Inhalación de sustancias con carácter tóxico.
- Golpes o cortes con herramientas.
- Quemaduras causadas por soldaduras.
- Dermatitis por contacto de la piel con morteros, hormigones u otros materiales.

Las acciones de prevención y las medidas de protección colectivas serán:

- Barandillas rígidas y resistentes
- Redes de seguridad.
- Evitar trabajos simultáneos.
- Redes verticales perimetrales.
- Apuntalamientos.
- Señalizar obstáculos.
- Acopio correcto de los materiales.

Se utilizarán los siguientes equipos de protección individual, además, de los que se mencionan en la realización de la obra:

- Cables fiadores y mástiles.
- Guantes de goma.
- Arnese y cinturones de seguridad.

### 7.3. DURANTE EL ACABADO

Se pueden dar los riesgos siguientes:

- Explosiones, deflagraciones e incendios.
- Electrocución.
- Inhalación de sustancias de carácter tóxico.
- Lesiones y cortes.
- Caídas de trabajadores y materiales.
- Atrapamientos con objetos o herramientas.
- Quemaduras.
- Dermatitis por contacto con hormigón u otros materiales.
- Ambiente cargado de polvo.

Las acciones preventivas y de protección del colectivo son:

- Almacenamiento adecuado de los materiales.
- Barandillas.
- Ventilación suficiente.
- Minimizar los focos de inflamación.
- Plataforma de carga y descarga de los materiales.

Se utilizarán los siguientes equipos de protección individual, además, de los que se mencionan en la realización de la obra:

- Equipos autónomos de respiración.
- Cinturones de seguridad.
- Mascarilla filtrante.
- Guantes de goma.

#### **7.4. DURANTE LA INSTALACIÓN**

Se pueden dar los riesgos siguientes:

- Ambiente cargado de polvo.
- Electrocutaciones.
- Quemaduras.
- Dermatitis por contacto con materiales.
- Contactos con elementos en tensión de forma directa o indirecta.
- Golpes y aplastamiento de pies.
- Inhalación de sustancias de carácter tóxico.
- Lesiones y cortes.

Las acciones preventivas y de protección del colectivo son:

- Realizar las conexiones eléctricas sin estar sometidas a tensión:

Se utilizarán los siguientes equipos de protección individual, además, de los que se mencionan en la realización de la obra:

- Mascarilla filtrante.
- Guantes de goma.

### **8. RIESGOS LABORALES DE CARÁCTER ESPECIAL**

Estos riesgos laborales especiales abarcan los trabajos que, aun siendo imprescindibles para llevar a cabo la obra, llevan a riesgos de carácter especial para la salud y seguridad de los operarios, y es por esto que están dentro del Anexo II del R.D. 1627/1997. Además, se señalan las medidas particulares que deben ser llevadas a cabo para reducir y verificar los riesgos derivados de dicho tipo de trabajo.

- Trabajos cercanos a líneas de tensión eléctrica. Se señalizarán y se respetará una distancia de seguridad de 4 metros como medidas preventivas. Además, se señalizará el lugar donde solo el personal autorizado puede acceder.

- Trabajos en los que se lleven a cabo montajes y desmontajes de materiales prefabricados de gran masa: Se aumentará las medidas preventivas en la utilización de la maquinaria que facilite la realización del trabajo marcando y señalando en perímetro donde solo puede acceder el personal autorizado.
- Trabajos donde se esté expuestos a agentes químicos y esto conlleve un riesgo de gravedad severa, o para los que la verificación específica de la salud de los operarios sea legalmente obligada. En este TFG se los trabajadores operan con agentes químicos tóxicos al inhalarlos. Para ello se adoptan medidas particulares, una de ellas: aislar a los trabajadores a zonas donde puedan tener contactos con los agentes químicos sin las protecciones pertinentes.

## **9. PREVISIONES PARA TRABAJOS FUTUROS**

En el Proyecto de Elaboración al que está referido este Estudio Básico de Seguridad e Higiene se han determinado una lista de fundamentos que ayudarán a trabajos futuros de mantenimiento y adecuación de los equipos en perfectas condiciones de salud y seguridad y que, una vez emplazados, se utilizarán para la seguridad durante la elaboración de la obra. Dichos elementos son: bocas de hombre, ganchos de servicio y elementos de acceso a cubierta.

## **10. NORMATIVA DE SEGURIDAD Y SALUD APLICADA A LA OBRA**

Se adaptará la legislación vigente que se cita:

### **10.1. LEGISLACIÓN GENERAL**

- Ley de Prevención de Riesgos Laborales (Ley 31/1995).
- Reglamento de los Servicios de Prevención (R.D. 39/1997).
- Disposiciones mínimas de seguridad y salud en obras de construcción (R.D. 1627/1997).
- Disposiciones mínimas en materia de señalización de seguridad y salud (R.D. 485/1997).



- Modelo de libro de incidencias (Orden 20-09-86).
- Modelo de notificación de accidentes laborales (Orden 16-12-87).
- Reglamento Seguridad e Higiene en el Trabajo de la Constitución (Orden 20-05-52).
- Cuadro de enfermedades profesionales (RD 1299/2006).
- Ordenanza general de seguridad e higiene en el trabajo (Orden 09-03-71).
- Ordenanza trabajo industrias construcción, vidrio y cerámica (Orden 28-08-79).
- Protección de riesgos derivados de exposición a ruidos (RD 286/2006).
- Disposiciones mínima seguridad y salud sobre manipulación manual de cargas (RD 487/1997).
- Estatuto de los trabajadores (R.D. Legislativo 2/2015).

## **10.2. LEGISLACIÓN PARA INSTALACIONES DE OBRAS Y EQUIPOS.**

- Disposiciones mínimas de seguridad y salud para utilización de los equipos de trabajo (R.D. 1215/1997).
- MIE-BT-028 del Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión (R.D. 842/2002).
- Reglamento Seguridad en las Máquinas (R.D. 1849/2000).
- Requisitos de seguridad y salud en máquinas (R.D. 1644/2008).

## **10.3. LEGISLACIÓN REFERIDA A LOS EPIs**

- Condiciones comerciales y libre circulación de EPI (RD 1407/1992).
- Disposiciones mínimas de seguridad y salud de equipos de protección individual (RD 773/1997).
- EPI contra caída de altura. Dispositivo de rescate (UNE EN 363:2009).
- Equipos de protección personal. Métodos de ensayo para calzado. (UNE-EN ISO 20344:2012).
- Especificaciones calzado seguridad uso profesional (UNE-EN ISO 20346:2014).
- Especificaciones calzado protección uso profesional (UNE-EN ISO 20346:2014).
- Equipo de protección personal. Calzado de trabajo. (UNE-EN ISO 20347:2013).

#### 10.4. NOTAS TÉCNICAS DE PREVENCIÓN (NPT) DEL INSTITUTO NACIONAL DE SEGURIDAD E HIGIENE

- NPT 003: Señalización de conducciones.
- NPT 005: Identificación de productos químicos por etiqueta.
- NPT 008: Reglamentaciones relativas a productos químicos.
- NPT 028: Medios manuales de extinción.
- NPT 045: Plan de emergencia contra incendios.
- NPT 074: Confort térmico.
- NPT 108: Criterios toxicológicos generales para los contaminantes químicos.
- NPT 117: Toma de muestra de gases y vapores con bolsas.
- NPT 119: Cancerígenos químicos.
- NPT 135: Seguridad en el laboratorio.
- NPT 137: Etiquetado de sustancias peligrosas.
- NPT 140: Estadística y mediciones ambientales.
- NPT 166: Dermatitis por agentes químicos: prevención.
- NPT 198: Gases comprimidos: identificación en botellas.
- NPT 238: Los análisis de peligros y de operabilidad en instalaciones de proceso.
- NPT 243: Ambiente cerrados: calidad del aire.
- NPT 246: Intoxicaciones químicas: primeros auxilios.
- NPT 262: Protectores visuales contra impactos y/o salpicaduras: guías para la elección, uso y mantenimiento.
- NPT 297: Manipulación de bidones.
- NPT 302: Reactividad e inestabilidad química: análisis termodinámico preliminar.
- NPT 347: Contaminantes químicos: evaluación de la concentración ambiental.
- NPT 768: Transvase de agente químicos: medidas básicas de seguridad.
- NPT 769: Ropa de protección: requisitos generales.
- NPT 871, 878, 880 y 881: Regulación UE sobre producto químicos.
- NPT 929: Ropa de protección contra productos químicos.
- NPT 935-937: Agentes químicos.
- NPT 1012: Unidades de olor: evaluación de la molestia en ambiente interiores industriales.

# DOCUMENTO 7: EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL.

El presente documento se realiza regulado según dictan los requerimientos ambientales que se obliga para este proyecto según se establece en la Ley 21/2013 dictada el 9 de diciembre sobre el impacto ambiental.

Dicha ley dicta los fundamentos que deben llevar dicha evaluación de impacto ambiental de cualquier tarea que puedan desarrollar efectos significativos sobre el medio ambiente, asegurando en todo el país un alto nivel de seguridad en lo que al medio ambiente se refiere con la meta de llevar a cabo un desarrollo sostenible, a través de:

- La unificación de la apariencia medioambiental en la realización y adopción de cada tarea, proyecto y programa.
- El estudio de cada opción que se den posibles ambientalmente.
- La instauración de las decisiones de atención, rastreo y sanción que sean necesarias para que se cumplan los propósitos de dicha ley.
- La instauración de las decisiones que posibiliten, prever, reparar y, si fuese necesario, resarcir los efectos desfavorables sobre el medio ambiente.

El segundo capítulo de dicha ley controla la evaluación d impacto ambiental de Proyectos dando una acrecentada seguridad de carácter jurídico. Exactamente, en el primer anexo de la citada ley, se guardan los proyectos que se encuentran sometidos a la evaluación de impacto ambiental de carácter ordinario. Entretanto en el segundo anexo se incorporan proyectos que están sometidos a la evaluación ambiental sintetizada.

Se lleva a cabo una evaluación del impacto ambiental común cuando se predice que las tareas, programas y proyectos pueden presentar efectos importantes sobre el medio ambiente, y es por ello, que estos deben ser comprobados a priori de su verificación, permiso o adopción, de acuerdo con la práctica ordinaria.

Si fuese necesario la elaboración de la evaluación de impacto ambiental del presente TFG, el proceso diseñado estaría dentro del anexo I, en el grupo 5: “Industria Química, Petroquímica, Textil y Papelera”, apartado “a”: “Instalaciones para la producción a escala industrial de sustancias mediante transformación química o biológica”, apartado primero: “Productos químicos orgánicos”.